

Неравномерность микротвердости и микроструктуры малоуглеродистой стали, прокатанной на двухклетьевом прокатно-дрессировочном стане

© 2023

*Иванов Владимир Петрович*¹, доктор технических наук, профессор
Пилипенко Станислав Владимирович^{*2}, кандидат технических наук, доцент
*Штемпель Олег Петрович*³, кандидат технических наук, доцент
*Вигерина Татьяна Владимировна*⁴, кандидат технических наук, доцент

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк (Республика Беларусь)

*E-mail: s.pilipenko@psu.by,
44-08@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4621-7155>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1110-2016>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7247-0798>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8862-5456>

Поступила в редакцию 07.04.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Аннотация: Актуальность работы обосновывается двумя факторами. Первый – необходимость исследования характера изменения микроструктуры поперечного сечения особо тонкой жести из стали TS 435 (аналог стали 08пс), дрессированной на новом, недавно введенном в эксплуатацию стане DSR-1250 Миорского металлопрокатного завода. Второй – необходимость разработки эффективного метода получения точных геометрических характеристик косяго реза жести толщиной 0,19 мм и меньше. Целью работы является определение изменений микротвердости и микроструктуры по толщине образцов жести, определение наличия необходимой для данного вида листопрокатной продукции «слоистой» микроструктуры. Исследование проводилось на отобранных образцах жести из стали TS 435 толщиной 0,19 мм. Данная жесь прокатывалась из отожженной полосы толщиной 0,224 мм. Общая величина относительного обжатия в стане составила 15 %, а относительное обжатие в дрессировочной клетке – не менее 3 %. Были проведены замеры микротвердости в разных точках по толщине отобранных образцов жести. Значения микротвердости по толщине полосы усреднили использованием интерполяции полиномом 6-й степени. Для исследования величины зерна сделали ряд снимков микроструктуры различных областей по толщине листа с увеличением в 500 раз. Исследования микроструктуры показали явно выраженную деформационную микроструктуру с вытянутыми по направлению прокатки зернами. У самой границы контакта металла с валками зерна получили наибольшую деформацию. Наиболее высокие значения микротвердости выявлены в двух зонах, прилегающих к обеим поверхностям полосы, и в центральных слоях по толщине полосы. Изменение величин микротвердости по толщине листа имеет волнообразный характер с тремя ярко выраженными зонами увеличения твердости и двумя зонами падения ее значений. Зоны с наиболее низкими значениями микротвердости расположены между зонами с максимальными значениями.

Ключевые слова: жесь; малоуглеродистая сталь; TS 435; неравномерность микротвердости; неравномерность микроструктуры; сечение полосы; косой срез; соотношение размеров зерна; прокатно-дрессировочный стан.

Благодарности: Авторы приносят искреннюю благодарность руководству ООО «Металлопрокатная компания» (г. Миоры, Республика Беларусь) за предоставление образцов для проведения исследований и участие в обсуждении результатов.

Для цитирования: Иванов В.П., Пилипенко С.В., Штемпель О.П., Вигерина Т.В. Неравномерность микротвердости и микроструктуры малоуглеродистой стали, прокатанной на двухклетьевом прокатно-дрессировочном стане // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 2. С. 35–45. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-9.

ВВЕДЕНИЕ

Холоднокатаные листы являются одним из наиболее распространенных и используемых видов прокатной продукции. Развитию теории и технологии холодной листовой прокатки посвящено много научных трудов. Необходимые конечные свойства такой листопрокатной продукции, как жесь, обеспечиваются дрессировкой, технология которой во многом определяет качество жести [1–3]. В большинстве случаев жесь сама является заготовкой для холодной штамповки [4]. Очень важно, чтобы при такой обработке не происходило разрушения целостности листа и на его поверхности не образовывались линии сдвига [5; 6]. Дрессировка обес-

печивает хорошую штампуемость, хорошую плоскостность листов и необходимую шероховатость поверхности [5]. Последнее особенно важно при нанесении покрытий на поверхность листа (лужение и пр.). На диаграммах растяжения дрессированных листов отсутствует площадка текучести, или же ее длина значительно уменьшается [6–8]. Это позволяет увеличить точность процесса штамповки и предотвращает искажение отштампованных деталей [6; 9; 10].

При дрессировке листов из малоуглеродистой стали с относительным обжатием до 1,2 % предел текучести материала снижается. Это объясняется процессами рождения новых дислокаций. При относительных обжатиях более 1,2 % предел текучести начинает повышаться [5].

Как правило, при дрессировке листов из малоуглеродистой стали относительное обжатие находится в пределах от 0,5 до 3 %. Дрессировка проводится после отжига холоднокатаных листов (как правило, в защитной атмосфере) [11–13].

В 2020 г. на Миорском металлопрокатном заводе была запущена в строй линия производства белой жести [14]. По техническим характеристикам установленное оборудование позволяет прокатывать листовой металл с минимальной толщиной 0,15 мм.

В технологической линии установлены два прокатных стана: RCM-1250 – 6-валковый реверсивный стан холодной тонколистовой прокатки и DSR-1250 – непрерывный прокатно-дрессировочный стан, состоящий из одной обжимной клетки (кварто) и одной дрессировочной клетки (кварто).

На завод поступают рулоны протравленного отожженного листа толщиной 2 мм. Технологический процесс холодной прокатки листов на этом заводе состоит из следующих основных операций (рис. 1). После подготовительных операций рулоны (1) прокатываются в несколько проходов до нужной толщины (2) на реверсивном стане RCM-1250 (3). Далее рулоны (4) после электролитической очистки (5) подаются на отжиг. Отжиг производится в колпаковых печах с защитной ат-

мосферой (6). Отожженные рулоны передаются для прокатки в двухклетьевом прокатно-дрессировочном стане DSR-1250 (7 и 8).

После прокатки полос в стане DSR-1250 рулоны передаются на лужение, резку, смотку и упаковку (9, 10).

В стане DSR-1250 последовательно происходит процесс обжатия листа, отожженного в среде с защитной атмосферой, и процесс его дрессировки. Очевидно, что прокатка ведется с натяжением. Интерес представляет изучение особенностей такого процесса, в том числе изменений микротвердости и микроструктуры металла по толщине полосы жести.

В процессе дрессировки с ростом степени деформации растет предел прочности и твердость металла, а предел текучести до определенной для каждого металла границы степени деформации сначала падает, а затем увеличивается. Таким образом, о степени деформации данного металла при дрессировке удобно судить по изменению его микротвердости, так как эта величина непрерывно возрастает.

Цель исследования – изучение микроструктуры и характера изменения микротвердости по толщине листа дрессированных полос жести из стали TS 435 (изготовленных в соответствии с требованиями EN 10202:2001).

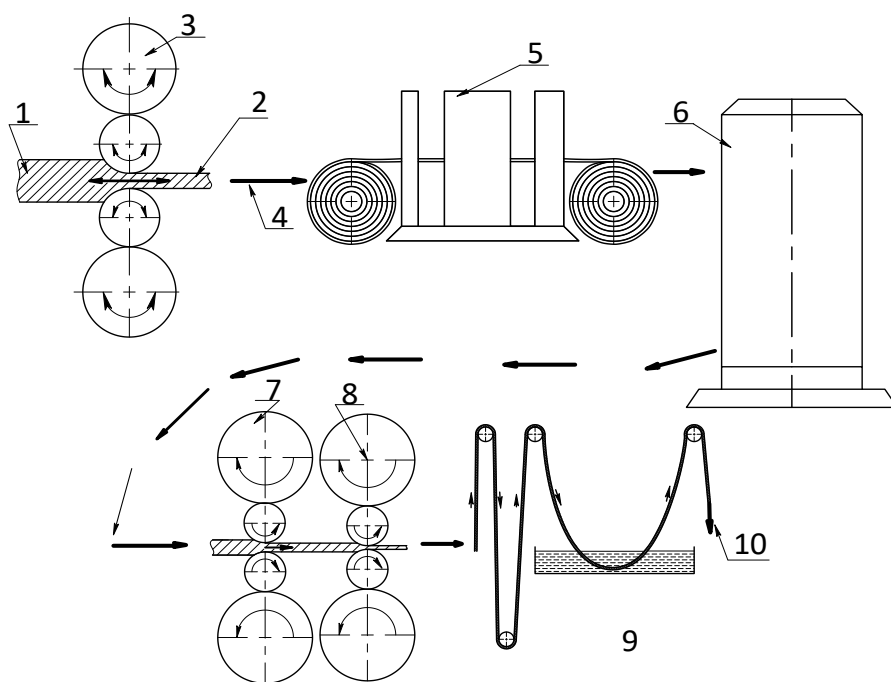


Рис. 1. Производство белой жести на Миорском металлопрокатном заводе:

- 1 – рулоны протравленного отожженного листа толщиной 2 мм; 2 – полоса, выходящая из стана RCM-1250;
- 3 – реверсивный стан RCM-1250; 4 – перемещение рулонов по технологической линии цеха;
- 5 – установка электролитической очистки; 6 – колпаковые печи; 7 – обжимная клетка стана DSR-1250;
- 8 – дрессировочная клетка стана DSR-1250; 9 – лудильный агрегат; 10 – резка, смотка, упаковка и сбыт

Fig. 1. Tinplate production at Miory Metal Rolling Plant:

- 1 – coils of etched annealed sheet 2 mm thick; 2 – a strip leaving the RCM-1250 mill; 3 – RCM-1250 reversing mill;
- 4 – movement of coils along the technological line of the workshop; 5 – electrolytic cleaning plant; 6 – bell-type furnaces;
- 7 – cogging stand of the DSR-1250 mill; 8 – pinch-pass stand of the DSR-1250 mill; 9 – tinning stack;
- 10 – cutting, coiling, packing, and sales

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на полосе жести из стали TS 435 (аналоге марки 08пс согласно ГОСТ 1050) толщиной 0,19 мм. Данная жесь выкатана в стане DSR-1250 (SMS-group) из отожженной полосы толщиной 0,224 мм. Общая величина относительного обжатия в стане составила 15 %, величина относительного обжатия в дрессировочной клетки – 3 %.

Для исследования микротвердости и микроструктуры была разработана нижеописанная методика.

Образцы вырезались из участков посередине ширины прокатанной полосы жести вдоль и поперек направления прокатки.

Для обеспечения возможности выполнения множественных замеров микротвердости по толщине полосы жести (0,19 мм) применяли технологию шлифовки поверхности под углом 3°. Это открывает возможность выполнения замеров микротвердости в большом количестве точек по толщине полосы на косом шлифованном срезе. Технология подготовки образца для выполнения косого шлифования полосы жести показана на рис. 2.

Как видно из рис. 2, подготовленный для исследования косого среза образец в виде полосы жести наклеивался на полосу-основу (рис. 2 а), сошлифованную под углом 3° к горизонтальной линии. Затвердевание клея на подготовленных таким образом образцах должно происходить под нагрузкой. В данном случае полосы-образцы прижимались струбциной с резиновыми прокладками (полоса-образец прижимается к основе поверхностью с наклоном в 3°). Возможно использование прессы (с такими же прокладками и контейнером, обеспечивающим нужное положение полосы-образца, основы и поверхности, прижимающей к ней полосу). После затвердевания клея (рис. 2 б) образец помещается в контейнер и заливается эпоксидной смолой. После затвердевания смолы ненужная часть исследуемой полосы жести сошлифовывается.

На рис. 3 показан контейнер с образцами после шлифовки. Как видно из рисунка, на подготовленных вышеописанным способом образцах (рис. 2) в процессе плоского шлифования контейнера с образцами угол косого среза в 3° образовывается самопроизвольно.

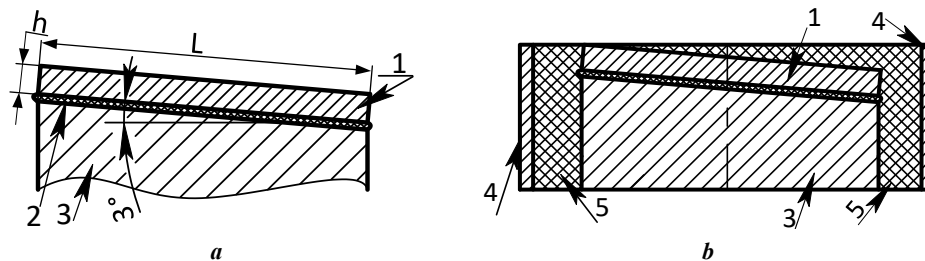


Рис. 2. Технология подготовки образца для выполнения косого среза с целью исследования микроструктуры жести:

a – наклейка полосок жести на металл основы; **b** – заливка образца эпоксидной смолой.

1 – исследуемая полоса жести с соответствующей длиной площадки для замеров микротвердости по толщине полосы жести; 2 – слой быстросохнущего клея; 3 – полоса-основа; 4 – цилиндрический контейнер; 5 – эпоксидная смола; *h* – толщина полосы жести

Fig. 2. The technology of preparing a specimen for an oblique cut to study tinplate microstructure:

a – sticking tinplate strips on the base metal; **b** – pouring the specimen with epoxy resin.

1 – test tinplate strip with the corresponding length of the platform to measure microhardness along the tin strip thickness;

2 – fast-setting glue layer; 3 – base strip; 4 – cylindrical container; 5 – epoxy resin; *h* – tinplate strip thickness

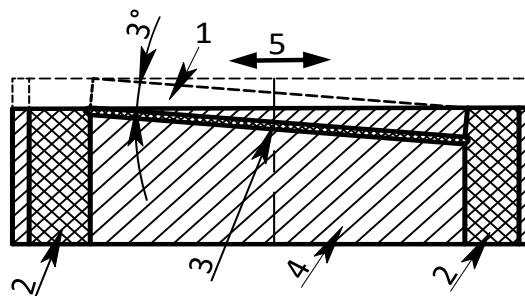


Рис. 3. Контейнер с образцами жести после плоскошлифовального аппарата:

1 – сошлифованная часть образца; 2 – эпоксидная смола; 3 – слой быстросохнущего клея;

4 – металлическая основа с наклеенным образцом; 5 – направление движения шлифовального инструмента

Fig. 3. A container with tinplate specimens after flat grinding machine:

1 – ground part of a specimen; 2 – epoxy resin; 3 – fast-setting glue layer; 4 – metal base with a glued specimen;

5 – movement direction of a grinding tool

Подготовка образцов производилась на полировальной станции Presi Mecarol P262. Для исследования микро­структуры использовался микроскоп Nikon Epi­phot 200 с возможностью увеличения до 1000 раз. Твердость по Виккерсу определялась на микротвердоме­ре Buehler Model No 1105D. Травитель – раствор Ржешотарского (5%-ный раствор азотной кислоты в спирте).

Измерения микротвердости поверхностей произво­дились по методу Виккерса с малой нагрузкой на микротвердоме­ре Buehler Model No 1105D. Усилие составило 0,9807 Н, что соответствует шкале твердости HV 0,1. Время приложения нагрузки – 10 с. Применяли алмазный наконечник с формой рабочей части в виде четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием.

В ходе исследования образцов прокатанной стали производились:

- многократные замеры микротвердости на поверх­ностях полосы жести с последующим выведением средних значений для конкретных образцов;

- многократные замеры микротвердости торцевых шлифов с замерами микротвердости в трех местах: в 40 мкм от края поверхности полосы каждого торцево­го шлифа и посередине шлифа. Выводились средние значения (отдельно для каждого края и середины кон­кретного торцевого шлифа);

- многократные замеры микротвердости на косых срезах с шагом в 50–100 мкм вдоль косо­го среза. На каждой координате производилось до 25 замеров. Вы­водились средние значения по методике, описанной в [15; 16].

Неопределенность измерений твердости нивелиро­валась методом измерений ряда эталонных мер твердо­сти (разброс значений величин твердости укладывается в $\pm 12,5\%$) [17].

Размер зерна в срединных областях поперечного сече­ния полосы вычислялся методом подсчета пересече­ний границ зерен [18; 19]. Исходя из толщины листа,

для подсчета пересечений вдоль осей X и Y был выбран отрезок длиной 0,08 мм. Для подсчета количества пере­сечений зерен вдоль диагональной линии (относитель­но осей X и Y) была выбрана длина отрезка в 0,113 мм. Отрезки располагались на каждом снимке в случайном порядке. Следует заметить, что ось X всегда совпадала с толщиной листа.

Размер зерна в приповерхностных областях также определялся методом подсчета пересечений границ зерен [20]. Подсчет производился вдоль оси Y на ряде отрезков длиной 0,09 мм. Отрезки располагались на каждом снимке в случайном порядке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4 показана микро­структура металла полосы, поступающей на дрессировку в стан DSR-1250 и пред­варительно отожженной в колпаковой печи с защитной атмосферой (рис. 1, позиция 6).

Как видно из рис. 4, микро­структура образцов из отожженной стали TS 435 представляет собой в целом гомогенную ферритную структуру с выраженными равновесными зернами. По телу ферритных зерен отно­сительно равномерно распределены мелкодисперсные включения, вероятно, имеющие карбидную природу. Микротвердость в приповерхностной зоне полосы составляет $79,71\text{ HV}\pm 7\%$, в срединных областях – $78,89\text{ HV}\pm 5,5\%$.

Как видно из анализа результатов замеров (рис. 5 и 6), в образцах наблюдаются 3 зоны наиболее высоких значений твердости:

- на обеих поверхностях полосы;
- в центральных слоях толщины полосы.

На глубине от 0,04 до 0,05 мм от поверхности полосы на торцевом резе и от 0,01 до 0,015 мм на косых срезах наблюдаются зоны наиболее низких значений твердости. Таким образом, усредненные значения микротвердости

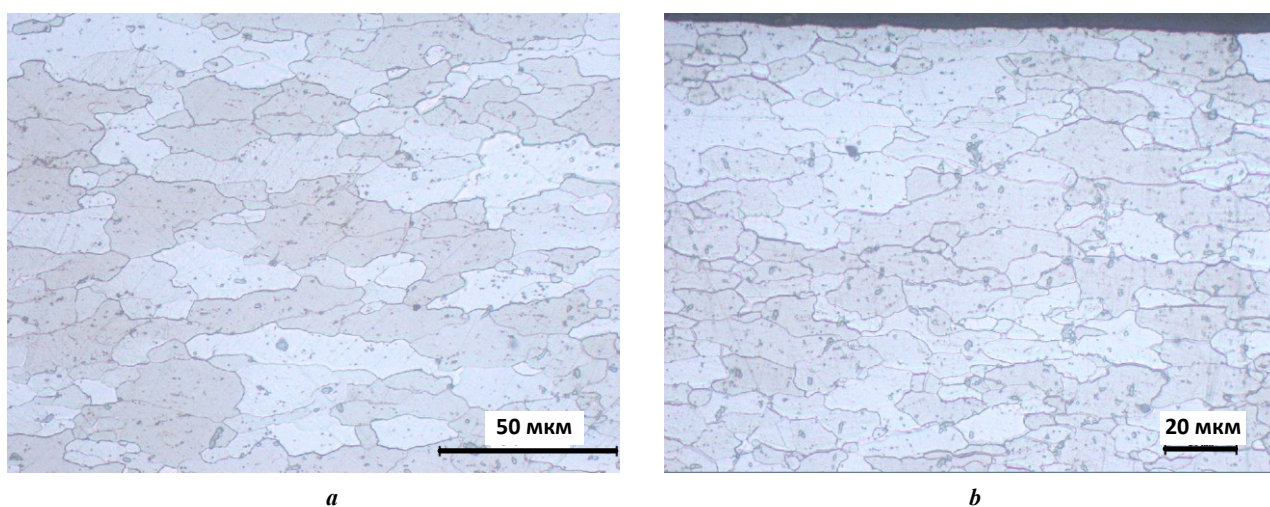


Рис. 4. Микро­структура металла отожженной полосы из стали TS 435 толщиной 0,224 мм, которая поступает на дрессировку в стан DSR-1250 ($\times 500$):

a – центральная часть поперечного сечения полосы; **b** – поверхностная часть поперечного сечения полосы

Fig. 4. Metal microstructure of an annealed TS 435 steel strip 0.224 mm thick, which is fed to the DSR-1250 mill for skin pass ($\times 500$):

a – central part of the strip cross section; **b** – surface part of the strip cross section

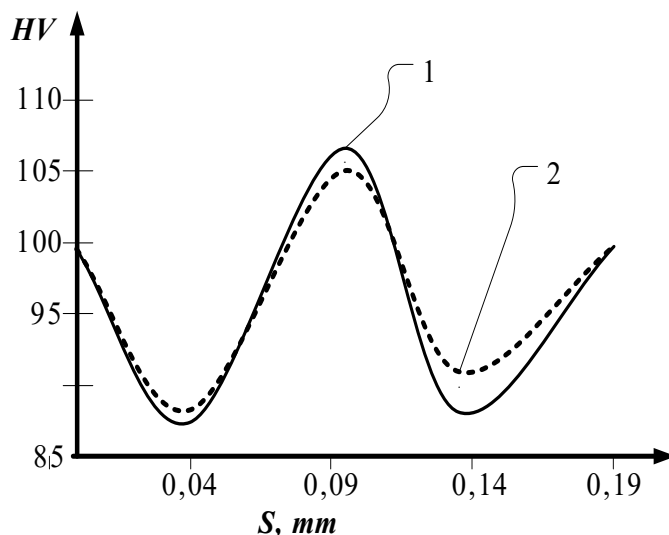


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине листа из стали TS 435 толщиной 0,19 мм, подвергшегося дрессировке в стане DSR-1250, по результатам замеров с торца листа: S – глубина (координата замера) по толщине листа; HV – микротвердость на поверхности косога реза; 1 – замеры реза поперек; 2 – замеры реза вдоль

Fig. 5. Microhardness distribution along the thickness of the TS 435 steel sheet 0.19 mm thick subjected to skin pass in the DSR-1250 mill, according to the results of measurements from the sheet end face: S – depth (measurement coordinate) along the sheet thickness; HV – microhardness on the oblique cut surface; 1 – cross cut measurements; 2 – along cut measurements

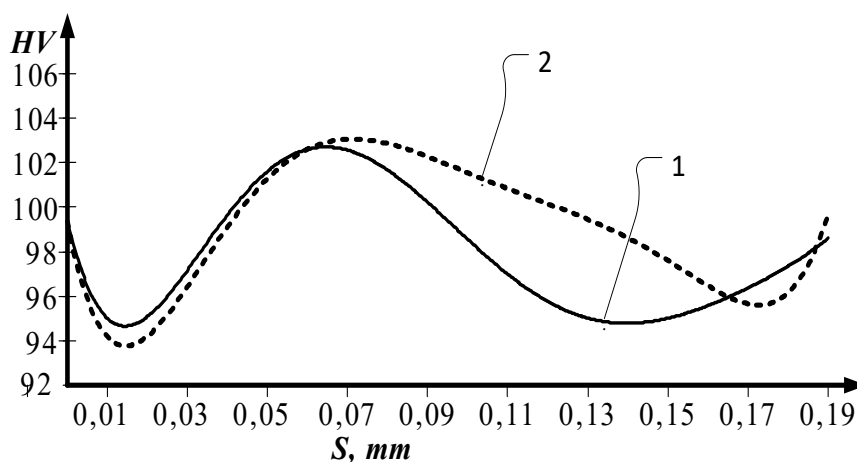


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине листа из стали TS 435 толщиной 0,19 мм, подвергшегося дрессировке в стане DSR-1250, по результатам замеров на поверхности косога реза: HV – микротвердость на поверхности косога реза; S – глубина (координата замера) по толщине листа; 1 – замеры реза поперек; 2 – замеры реза вдоль

Fig. 6. Microhardness distribution along the thickness of the TS 435 steel sheet 0.19 mm thick subjected to skin pass in the DSR-1250 mill, according to the results of measurements on the oblique cut surface: HV – microhardness on the oblique cut surface; S – depth (measurement coordinate) along the sheet thickness; 1 – cross cut measurements; 2 – along cut measurements

(полученные интерполяцией полиномом 6-й степени) показывают волнообразное изменение величин твердости по глубине листа с тремя ярко выраженными зонами увеличения твердости и двумя зонами падения ее значений. Другими словами, различные слои по глубине листа получили разную степень деформации.

На рис. 7 показаны фотографии микроструктур поперечных сечений исследуемых полос жести. Исследование микроструктуры на шлифе толщины полосы

жести, расположенном вдоль направления прокатки (рис. 7 а), показало наличие явно выраженной полосчатой (волокнистой, вытянутой) микроструктуры по направлению прокатки. Зерна вытянуты в сторону продольной деформации (вдоль линии прокатки).

На шлифе, где толщина полосы жести расположена в плоскости поперек линии прокатки (рис. 7 б), ширина зерен меньше, чем их длина на шлифе, выполненном вдоль направления прокатки. Для исследования величины

зерна сделан ряд снимков микроструктуры в областях, приграничных к поверхности полосы жести (рис. 8 а и 9 а) и в срединных областях полосы (рис. 8 б и 9 б). Снимки выполнены с увеличением в 500 раз. По приведенным снимкам можно судить об изменении микроструктуры вдоль поперечного сечения полосы.

Подсчет дал следующие результаты:

– в приграничной к поверхности области толщины листа, в сечении вдоль линии прокатки, по оси X – 305 зерен (1,6 мм), по оси Y – 119 зерен (2,4 мм), вдоль диагональной линии – 322 зерна (2,263 мм);

– в срединной области толщины листа, в сечении вдоль линии прокатки, по оси X – 567 зерен (3,28 мм), по оси Y – 98 зерен (2,56 мм), вдоль диагональной линии – 357 зерен (2,828 мм);

– в приграничной области толщины листа, в сечении поперек линии прокатки, по оси X – 273 зерна (1,6 мм), по оси Z – 181 зерно (2,4 мм), вдоль диагональной линии – 296 зерен (2,263 мм);

– в срединной области толщины полосы, в сечении поперек линии прокатки, по оси X – 289 зерен (2,08 мм), по оси Z – 152 зерна (2,32 мм), вдоль диагональной линии – 256 зерен (2,263 мм).

Данные расчетов обрабатывались по стандартной методике [16; 18]. В таблицах 1 и 2 указаны данные о средней величине зерен в описанных выше направлениях.

Помимо размеров зерен получены данные о среднем отношении длины зерна по оси Z к длине по оси X как поперек линии прокатки (коэффициент ширины зерна), так и вдоль линии прокатки (коэффициент длины зерна).

В ходе определения размеров зерен в районе области контакта металла с валками насчитано 103 зерна поперек линии прокатки (1,44 мм) и 56 зерен (1,8 мм) вдоль линии прокатки. Результаты расчетов величины зерен вдоль линии прокатки (длина зерна) и поперек нее (ширина зерна) сведены в таблицу 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определено, что микроструктура исследованных образцов представляет собой феррит с разной степенью пластической деформации по толщине листа.

Очевидны различия микроструктуры на шлифах, выполненных вдоль и поперек линии прокатки (рис. 7–9), так как на этот фактор главным образом повлияли схемы пластического деформирования при предварительной холодной прокатке в первой клетке и дрессировке во второй клетке непрерывного 2-валкового прокатно-дрессировочного стана DSR-1250.

Как видно из таблиц 1 и 2, коэффициент длины зерна всегда больше величины коэффициента ширины зерна – как в приграничных, так и в центральных областях по ширине полосы. Это вполне естественно для листовой прокатки [15; 20]. Можно сделать вывод, что уширение зерен центральных областей несколько меньше уширения зерен в приграничных к поверхности полосы областях (коэффициент ширины 2,311 против 2,208). Это может быть вызвано воздействием сил трения, действующим вдоль линии прокатки на поверхности контакта валков и металла.

Рассматривая коэффициент длины зерна, можно сделать вывод о том, что зерна в приграничных областях получили меньшую вытяжку, чем зерна в срединных областях толщины листа (коэффициент длины зерна 4,017 против 4,716).

Наименьший размер зерна во всех случаях обнаружен при подсчетах количества зерен вдоль диагональных линий и вдоль оси X . Из визуального анализа фотографий микроструктур приграничных областей можно заметить, что зерна у самой границы контакта металла с валками получают наибольшую деформацию.

В срединных областях, где деформация происходит при значительном действии растягивающих напряжений, встречаются осколки зерен и даже одиночные разрушенные зерна, что естественно и допустимо.

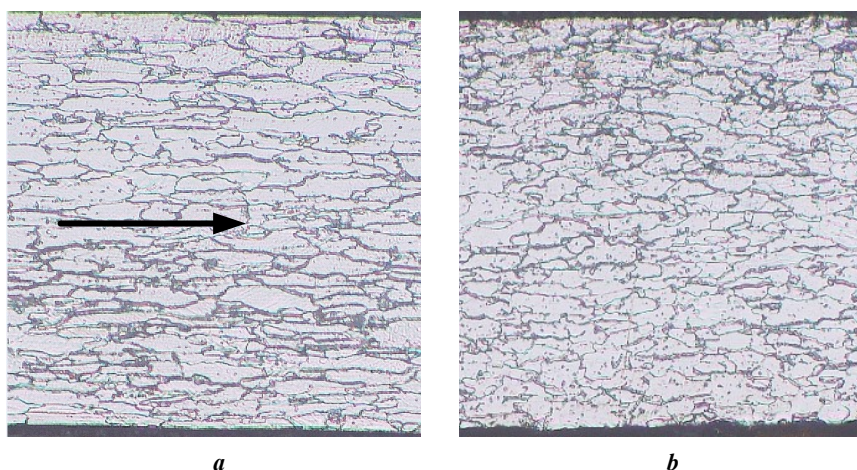


Рис. 7. Микроструктура листа жести из стали TS 435 толщиной 0,19 мм:

a – микроструктура в сечении толщины полосы ($\times 200$) вдоль линии прокатки (стрелка – направление прокатки);
b – микроструктура в сечении толщины полосы ($\times 200$) поперек линии прокатки (направление прокатки – на нас)

Fig. 7. Microstructure of the TS 435 steel tinplate sheet 0.19 mm thick:

a – microstructure in the strip thickness section ($\times 200$) along the rolling line (an arrow – the rolling direction);
b – microstructure in the strip thickness section ($\times 200$) across the rolling line (the rolling direction – toward us)

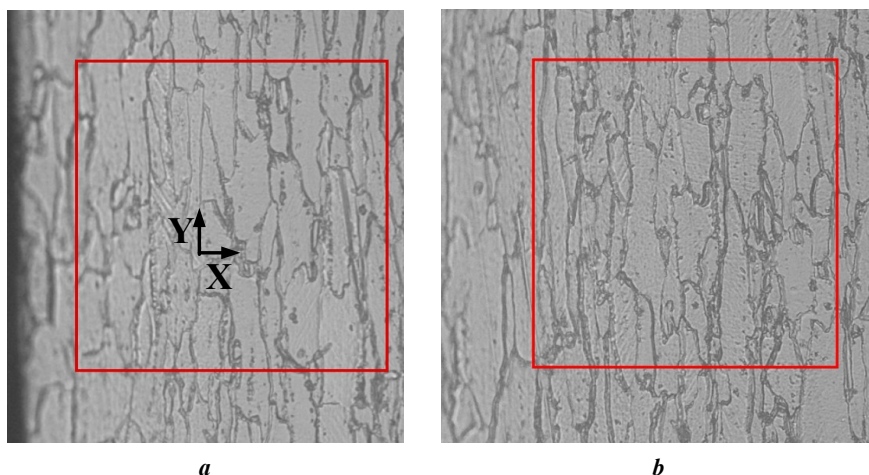


Рис. 8. Микроструктура жести в сечениях толщины листа из стали TS 435 толщиной 0,19 мм в плоскости вдоль линии направления прокатки ($\times 500$):

a – область торца листа, прилегающая к поверхности;
b – срединная область торца листа (квадрат 0,08 \times 0,08 мм).

Ось X ориентирована по толщине листа, Y – вдоль оси прокатки

Fig. 8. Tinplate microstructure in the thickness sections of the TS 435 steel sheet 0.19 mm thick in the plane along the rolling direction line ($\times 500$):

a – sheet end face area adjacent to the surface; **b** – sheet end face middle area (a square 0.08 \times 0.08 mm).

X-axis is oriented along the sheet thickness, Y-axis – along the rolling axis

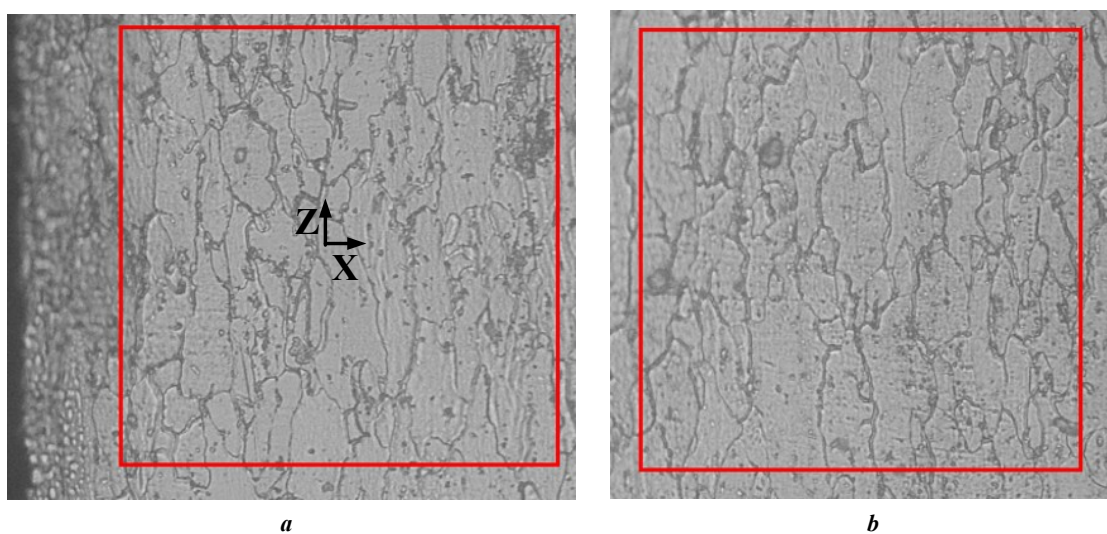


Рис. 9. Микроструктура жести из стали TS 435 толщиной 0,19 мм в плоскости поперек линии направления прокатки ($\times 500$):

a – область торца листа, прилегающая к поверхности; **b** – срединная область торца листа (квадрат 0,08 \times 0,08 мм).
 Ось X ориентирована по толщине листа, Z – поперек оси прокатки (по ширине листа)

Fig. 9. Microstructure of the TS 435 steel tinplate sheet 0.19 mm thick in the plane across the rolling direction line ($\times 500$):

a – sheet end face area adjacent to the surface; **b** – sheet end face middle area (a square 0.08 \times 0.08 mm).

X-axis is oriented along the sheet thickness, Z-axis – across the rolling axis (along the sheet width)

Как видно из таблиц 1 и 2, среднее отношение длины зерна к его ширине равно 1,561 в крайней области торца полоски жести и 1,729 – в его срединных частях.

Как видно из таблицы 3, отношение длины зерна к ширине равно 2,299. Таким образом, в двух зонах зерна получили большую вытяжку – в зоне непосредственного контакта металла с валком (поверхность листа) и в срединных областях относительно толщины листа.

Именно в этих областях и наблюдаются повышенные значения микротвердости.

Таким образом, в ходе исследований изменения микроструктуры и микротвердости сверхтонкой жести из стали TS 435, выкатанной в стане DSR-1250, подтверждено ожидаемое наличие слоистой структуры полос, характерной для дрессированного листового материала. Согласно работам [1; 2; 6; 10], образование

Таблица 1. Средняя величина зерна в сечении поперек линии прокатки
Table 1. The average grain size in the section across the rolling line

Место замера	Срез поперек линии прокатки		
	Ось замера	Средний размер зерна, мм	Среднее отношение длины зерна по оси Z (по ширине полосы) к длине по оси X (по толщине полосы)
Край толщины листа	X	0,00594±12,5 %	2,311
	Z	0,01374±15,0 %	
	по диагонали	0,00767 ^{+12,0%} _{-7,5%}	
Середина толщины листа	X	0,00728±12,5 %	2,208
	Z	0,01608±16,0 %	
	по диагонали	0,00908±10,5 %	

Таблица 2. Средняя величина зерна в сечении вдоль линии прокатки
Table 2. The average grain size in the section along the rolling line

Место замера	Срез вдоль линии прокатки		
	Ось замера	Средний размер зерна, мм	Среднее отношение длины зерна по оси Y (вдоль оси прокатки) к длине по оси X (по толщине полосы)
Край толщины листа	X	0,00534±14,5 %	4,017
	Y	0,02145±12,0 %	
	по диагонали	0,00714±12,5 %	
Середина толщины листа	X	0,00589±14,5 %	4,716
	Y	0,02779±12,5 %	
	по диагонали	0,00808±12,0 %	

Таблица 3. Средняя величина зерна в зоне контакта металла с валком
Table 3. The average grain size in the metal-to-roll contact area

Место замера	Ось замера	Средний размер зерна, мм	Среднее отношение длины зерна по оси Y к длине по оси X
В зоне контакта металла с валком	Срез – поперек линии прокатки		2,299
	X	0,01398±11,5 %	
	Срез – вдоль линии прокатки		
	Y	0,03214±12,0 %	

такой слоистой микроструктуры предотвращает выход на поверхность штампуемого листа линий Чернова – Людерса и способствует улучшению штампуемости листов. Как показывает практика, при лужении полос с подобной структурой улучшается схватывание луженого слоя с поверхностью.

Характер изменения микротвердости по толщине полос подтверждается соответствующим характером изменения микроструктуры. Обнаружено, что приповерхностные слои, так же как и срединные, получают большую степень деформации, чем слои металла между ними. Возможно, такой характер изменения механических характеристик по толщине листа связан с наличием значительной степени натяжения металла между клетями двухклетьевого стана DSR-1250. Известно, что в ходе прокатки полос на этом стане иногда наблюдалась даже их утяжка, что однозначно вызвано влиянием натяжения полосы.

ВЫВОДЫ

При дрессировке, выполненной на непрерывном прокатно-дрессировочном стане DSR-1250, в предварительно отожженных холоднокатаных тонких листах стали TS 435 образуется необходимая многослойная структура, в которой различные слои обладают индивидуальными сочетаниями микростроения (степень вытяжки зерен, их величина и пр.) и механических свойств.

В областях металла, прилегающих к поверхностям жести, слои подверглись деформирующему воздействию валков в большей степени, чем подповерхностные слои. В результате образовались поверхностные зоны, характеризующиеся более высокой твердостью и прочностью. В поверхностных зонах наблюдается большая степень вытяжки зерен, чем в подповерхностных.

В подповерхностных слоях наблюдаются меньшие показатели твердости. Зерна этих слоев получили меньшие значения деформации. Самые большие значения твердости отмечены в центральных областях поперечного сечения листа. Здесь наблюдаются отдельные разрушенные зерна. Возможно, более высокая твердость центральных слоев связана со значительной степенью натяжения полосы между клетями двухклетьевого стана DSR-1250. Приведенные выводы требуют дальнейшего, более широкого исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mazur V.L., Nogovitsyn O.V. Theory and Technology of Sheet Rolling: Numerical Analysis and Applications. London: CRS Press, 2019. 477 p.
- Mazur V.L. Preventing surface defects in the uncoiling of thin steel sheet // Steel in Translation. 2015. № 45. P. 959–966. DOI: [10.3103/S0967091215120062](https://doi.org/10.3103/S0967091215120062).
- Wang D.-C., Liu H.-M., Liu J. Research and Development Trend of Shape Control for Cold Rolling Strip // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. № 30. P. 1248–1261. DOI: [10.1007/s10033-017-0163-8](https://doi.org/10.1007/s10033-017-0163-8).
- Kozhevnikov A.V. The Development and Application of Methodologies for the Design of Technological Modes of Cold Rolling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 718. Article number 012007. DOI: [10.1088/1757-899X/718/1/012007](https://doi.org/10.1088/1757-899X/718/1/012007).
- Пименов А.Ф., Сосковец О.Н., Трайно А.И., Мазур В.Л., Чернов П.П., Добронравов А.И. Холодная прокатка и отделка жести. М.: Metallurgy, 1990. 206 с.
- Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. Процесс дрессировки холоднокатаных стальных полос (теория, технология, оборудование, тенденции их развития и совершенствования). Череповец: ЧГУ, 2017. 155 с.
- Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Исмагилов Р.Р. Теоретический анализ формирования шероховатости автомобильного листа при дрессировке в валках обработанных дробью // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 8. С. 600–605. DOI: [10.17073/0368-0797-2019-8-600-605](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-8-600-605).
- Cui H., Chen H., Lu L., He Z. Determinant parameters of surface morphology to corrosion behaviour of cold-rolled auto sheet steel // Journal of Materials Science. 2021. № 56. P. 8297–8308. DOI: [10.1007/s10853-021-05812-6](https://doi.org/10.1007/s10853-021-05812-6).
- Poddar V.S., Rathod M.J. Evaluation of mechanical properties of cold roll bonded mild steel and aluminum // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 43-5. P. 3014–3022. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.01.363](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
- Li T., Yan S., Liu X. Enhancement austenite content in medium-Mn steel by introducing cold-rolled deformation and inhibiting subsequent recrystallization // Materials Letters. 2021. Vol. 301. Article number 130249. DOI: [10.1016/j.matlet.2021.130249](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130249).
- Mazur V.L., Nogovitsyn O.V. Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications. New York: CRC Press, 2018. 500 p.
- Закарлюка С.В., Юрченко Ю.И., Гончаров В.Е., Будаква С.А. Изменение параметров неплоскостности при упругом растяжении полос // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 24. С. 3–12. EDN: [UQLSOA](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
- Зайцев А.И., Родионова И.Г., Колдаев А.В., Арутюнян Н.А., Александрова Н.М. Влияние состава, параметров обработки на микроструктуру и механические свойства холоднокатаного и оцинкованного проката из IF-сталей // Металлург. 2020. № 6. С. 41–47. EDN: [URLJOH](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
- Дьяконов В.А., Пилипенко С.В., Штемпель О.П. Влияние деформации на механические свойства луженой жести // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2022. № 10. С. 18–24. EDN: [YFNRXI](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
- Li L., Matsumoto R., Utsunomiya H. Experimental Study of Roll Flattening in Cold Rolling Process // ISIJ International. 2018. Vol. 58. № 4. P. 714–720. DOI: [10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-623](https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-623).
- Богуш Р.П., Адамовский Е.Р., Денисенко С.Ф. Обработка и анализ изображений микроструктуры металлов для определения балла зерна // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2021. Т. 19. № 4. С. 70–79. DOI: [10.35596/1729-7648-2012-19-4-70-79](https://doi.org/10.35596/1729-7648-2012-19-4-70-79).
- Анисович А.Г. Проблемы применения стандартов при оценке микроструктуры металлов и сплавов // Известия Национальной академии наук Беларуси.

- Серия Физико-технических наук. 2021. Т. 66. № 1. С. 12–19. DOI: [10.29235/1561-8358-2021-66-1-12-19](https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-12-19).
18. Анисович А.Г., Румянцева И.Н., Бислюк Л.В. Определение балла зерна стали компьютерными методами // Литье и металлургия. 2010. № 3S. С. 100–104. EDN: [UINMCT](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.037).
 19. Анисович А.Г., Андрушевич А.А. Микроструктуры черных и цветных металлов. Минск: Беларуская навука, 2015. 131 с.
 20. Li S., Wang Z., Guo Y. A novel analytical model for prediction of rolling force in hot strip rolling based on tangent velocity field and MY criterion // Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 47. P. 202–210. DOI: [10.1016/j.jmapro.2019.09.037](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.037).
- ### REFERENCES
1. Mazur V.L., Nogovitsyn O.V. *Theory and Technology of Sheet Rolling: Numerical Analysis and Applications*. London, CRS Press Publ., 2019. 477 p.
 2. Mazur V.L. Preventing surface defects in the uncoiling of thin steel sheet. *Steel in Translation*, 2015, no. 45, pp. 959–966. DOI: [10.3103/S0967091215120062](https://doi.org/10.3103/S0967091215120062).
 3. Wang D.-C., Liu H.-M., Liu J. Research and Development Trend of Shape Control for Cold Rolling Strip. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 30, pp. 1248–1261. DOI: [10.1007/s10033-017-0163-8](https://doi.org/10.1007/s10033-017-0163-8).
 4. Kozhevnikov A.V. The Development and Application of Methodologies for the Design of Technological Modes of Cold Rolling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 718, article number 012007. DOI: [10.1088/1757-899X/718/1/012007](https://doi.org/10.1088/1757-899X/718/1/012007).
 5. Pimenov A.F., Soskovets O.N., Trayno A.I., Mazur V.L., Chernov P.P., Dobronravov A.I. *Kholodnaya proklatka i otdelka zhesti* [Cold rolling and finishing of tinplate]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 206 p.
 6. Timofeeva M.A., Garber E.A. *Protsess dressirovki kholodnokatanykh stalnykh polos (teoriya, tekhnologiya, oborudovanie, tendentsii ikh razvitiya i sovershenstvovaniya)* [The process of training cold-rolled steel strips (theory, technology, equipment, trends in their development and improvement)]. Cherepovets, ChGU Publ., 2017. 155 p.
 7. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Y., Ismagilov R.R. Theoretical analysis of formation of automobile sheet roughness during temper rolling in shot-blasted rolls. *Steel in Translation*, 2019, vol. 49, no. 8, pp. 499–503. DOI: [10.3103/S0967091219080138](https://doi.org/10.3103/S0967091219080138).
 8. Cui H., Chen H., Lu L., He Z. Determinant parameters of surface morphology to corrosion behaviour of cold-rolled auto sheet steel. *Journal of Materials Science*, 2021, no. 56, pp. 8297–8308. DOI: [10.1007/s10853-021-05812-6](https://doi.org/10.1007/s10853-021-05812-6).
 9. Poddar V.S., Rathod M.J. Evaluation of mechanical properties of cold roll bonded mild steel and aluminum. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 43-5, pp. 3014–3022. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.01.363](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
 10. Li T., Yan S., Liu X. Enhancement austenite content in medium-Mn steel by introducing cold-rolled deformation and inhibiting subsequent recrystallization. *Materials Letters*, 2021, vol. 301, article number 130249. DOI: [10.1016/j.matlet.2021.130249](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130249).
 11. Mazur V.L., Nogovitsyn O.V. *Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications*. New York, CRC Press Publ., 2018. 500 p.
 12. Zakarlyuka S.V., Yurchenko Yu.I., Goncharov V.E., Budakva S.A. Non-flatness parameters variation in case of elastic stretching of strips Non-flatness parameters variation in case of elastic stretching of strips. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*, 2018, no. 24, pp. 3–12. EDN: [UQLSOA](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
 13. Zaytsev A.I., Rodionova I.G., Koldaev A.V., Arutyunyan N.A., Aleksandrova N.M. Effect of composition and processing parameters on microstructure and mechanical properties of cold-rolled and galvanized roll products from IF-steels. *Metallurg*, 2020, no. 6, pp. 41–47. EDN: [URLJOH](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
 14. Dyakonov V.A., Pilipenko S.V., Shtempel O.P. Influence of deformation on the mechanical properties of tin-plated tin. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki*, 2022, no. 10, pp. 18–24. EDN: [YFNRXI](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
 15. Li L., Matsumoto R., Utsunomiya H. Experimental Study of Roll Flattening in Cold Rolling Process. *ISIJ International*, 2018, vol. 58, no. 4, pp. 714–720. DOI: [10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-623](https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-623).
 16. Bogush R.P., Adamovskiy E.R., Denisenok S.F. Processing and analysis of images of microstructure metals for determining the grain point. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2021, vol. 19, no. 4, pp. 70–79. DOI: [10.35596/1729-7648-2012-19-4-70-79](https://doi.org/10.35596/1729-7648-2012-19-4-70-79).
 17. Anisovich A.G. Problems of application of standards in evaluation of microstructure of metals and alloys. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya Fiziko-tekhnicheskikh nauk*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 12–19. DOI: [10.29235/1561-8358-2021-66-1-12-19](https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-12-19).
 18. Anisovich A.G., Rummyantseva I.N., Bislyuk L.V. Determination of steel grain grade by computer methods. *Lite i metallurgiya*, 2010, no. 3S, pp. 100–104. EDN: [UINMCT](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.363).
 19. Anisovich A.G., Andrushevich A.A. *Mikrostruktury chernykh i tsvetnykh metallov* [Microstructures of ferrous and non-ferrous metals]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 131 p.
 20. Li S., Wang Z., Guo Y. A novel analytical model for prediction of rolling force in hot strip rolling based on tangent velocity field and MY criterion. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 47, pp. 202–210. DOI: [10.1016/j.jmapro.2019.09.037](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.037).

Irregularity of microhardness and microstructure of low-carbon steel rolled in a two-stand rolling-leveling mill

© 2023

Vladimir P. Ivanov¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor
Stanislav V. Pilipenko*², PhD (Engineering), Associate Professor
Oleg P. Shtempel³, PhD (Engineering), Associate Professor
Tatyana V. Vigerina⁴, PhD (Engineering), Associate Professor

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk (Republic of Belarus)

*E-mail: s.pilipenko@psu.by,
44-08@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4621-7155>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1110-2016>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7247-0798>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8862-5456>

Received 07.04.2023

Accepted 16.06.2023

Abstract: The relevance of the study is proved by two factors. One of them is the necessity to study the nature of the change in the microstructure of the cross-section of extra-thin tinplate made of TS 435 steel (analogue of 08ps steel) skin-passed in a new DSR-1250 mill of the Miory Metal Rolling Plant. The second factor is the need to develop an effective method for obtaining accurate geometry characteristics of an oblique cut of tinplate 0.19 mm or less thick. The purpose of the work is to determine the changes in microhardness and microstructure over the thickness of tinplate samples and identify the existence of a layer microstructure necessary for this type of flat-rolled products. The study was carried out on the selected samples of tinplate of TS 435 steel 0.19 mm thick. This tinplate was rolled from an annealed strip, 0.224 mm thick. The total magnitude of reduction in the mill was 15 %, and the reduction in the skin-pass stand was at least 3 %. The authors carried out measurements of microhardness at different points over the thickness of the selected tinplate samples. The microhardness values over the strip thickness were averaged using 6th degree polynomial interpolation. To study the grain dimension, a number of microstructure images were taken in various areas over the sheet thickness with $\times 500$ magnification. The microstructure studies showed a pronounced strain microstructure with grains elongated in the direction of rolling. At the very boundary of metal contacting the rolls, the grains received the greatest deformation. The highest values of microhardness were identified in two zones adjacent to both strip surfaces and in the central layers along the strip thickness. The change in the microhardness values along the sheet thickness has a wave-like character with three pronounced zones of increase in hardness and two zones of a decrease in its values. The zones with the lowest microhardness values are located between the zones with the maximum values.

Keywords: tinplate; low-carbon steel TS 435; microhardness irregularity; microstructure irregularity; strip section; oblique cut; grain dimension ratio; rolling-leveling mill.

Acknowledgements: The authors express their sincere gratitude to the management of OOO Metal-Rolling Company (Miory, the Republic of Belarus) for the provision of samples for the research and participation in the discussion of the results.

For citation: Ivanov V.P., Pilipenko S.V., Shtempel O.P., Vigerina T.V. Irregularity of microhardness and microstructure of low-carbon steel rolled in a two-stand rolling-leveling mill. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 2, pp. 35–45. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-9.