

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-3-55-60>

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© **Виталий Михайлович Горицкий***, **Наталья Геннадьевна Силина**,
Георгий Рафаилович Шнейдеров

ЗАО «ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова», Россия, 117997, Москва, ул. Архитектора Власова, 49; *e-mail: oem@stako.ru

*Статья поступила 12 февраля 2019 г. Поступила после доработки 20 июля 2019 г.
Принята к публикации 27 ноября 2019 г.*

Стальные тонколистовые конструкции широко применяют в промышленности, в частности, в строительной индустрии. Цель работы — исследование структуры и механических свойств при растяжении и ударном изгибе стали марки 350 по ГОСТ Р 52246 в зонахгиба элементов оцинкованной тонколистовой стальной конструкции (ЛСТК). Для профилей толщиной 1,5 и 2,0 мм использованы пакетные листовые образцы, состоящие из двух и трех образцов с V-образным надрезом. Показано, что в диапазоне температур испытания от –20 до –90 °С в оцинкованных пластически деформированных образцах происходит вязкохрупкий переход. Критическая температура хрупкости T_{34} стали марки 350 снижается при уменьшении толщины проката от 3,0 до 1,5 мм, что обусловлено уменьшением жесткости напряженно-деформированного состояния при растяжении образца. При этом размер зерна феррита в исследованных ферритно-перлитных сталях (1,17 – 0,22 С; 0,11 – 0,14 Si; 0,49 – 0,54 % масс. Mn) изменяется мало и составляет 8,0 – 8,9 мкм. В зонахгиба элементов ЛСТК толщиной 3,0; 2,0 и 1,5 мм критическая температура хрупкости T_{34} достигает –74; –88 и 96 °С соответственно. Показано, что в элементах ЛСТК толщиной 3 мм в области критической температуры хрупкости в центральных зонах излома формируется кристаллическая поверхность разрушения, которая ориентирована перпендикулярно оси образца. В образцах из элементов конструкций толщиной 2 и 1,5 мм поверхность излома образована двумя плоскостями сдвига, ориентированными под углом 45° к оси образца, в основании которых располагаются колонии фасеток хрупкого транскристаллитного скола. Оцинкованные профили марки 350 по ГОСТ Р 52246 с размером зерна феррита 8,8 – 8,9 мкм пригодны к применению в ЛСТК толщиной 1,5 – 3,0 мм в диапазоне температур эксплуатации вплоть до –65 °С.

Ключевые слова: тонколистовой оцинкованный прокат; ударная вязкость KCV; ферритно-перлитная структура; размер зерна феррита; механические свойства; критическая температура хрупкости; ударные образцы.

CHARACTERISTICS OF THE RESISTANCE TO BRITTLE FRACTURE OF THE ELEMENTS OF LIGHT STEEL THIN-WALLED STRUCTURES DETERMINED ON SAMPLES WITH A SHARP NOTCH GROOVE

© **Vitalie M. Goritskiy***, **Natalia G. Silina**, **Georgiy R. Shneyderov**

ZAO “TsNIIPSK im. Melnikova”, 49 Arkhitektora Vlasova ul., Moscow, 117997, Russia; *e-mail: oem@stako.ru

Received February 12, 2019. Revised July 20, 2019. Accepted November 27, 2019.

The structure and mechanical properties of 350 steel (GOST R 52246) are studied under tensile and impact bending in the zones of bend of galvanized light-gage steel structure elements. Batch sheet samples consisting of two and three samples with a V-shaped notch were used for profiles 1.5 and 2.0 mm thick, respectively. It is shown that a visco-brittle transition occurs in the temperature range of 20 – 90 °C in galvanized samples subjected to plastic deformation. The critical temperature of brittleness T_{34} of steel 350 decreases with a decrease in the thickness of rolled products from 3.0 to 1.5 mm due to a decrease in the rigidity of the stress-strain state under tension. At the same time, the size of ferrite grains in the studied ferrite-pearlite steels (1.17 – 0.22 C; 0.11 – 0.14 Si; 0.49 – 0.54 wt.% Mn) changes slightly and amounts to 8.0 – 8.9 μm. A crystalline fracture surface oriented perpendicular to the axis of the sample is formed in the zones of bending of 3-mm light-gage steel structure elements in the region of the critical temperature of brittleness in the central zones of the fracture. In the samples 2 and 1.5 mm thick, the fracture surface is formed by two shear planes oriented at an angle of 45° to the sample axis at the base of which the colonies of facets of trans-crystallite cleavage are located. Galvanized steel 350 profiles (GOST R 52246) with a

ferrite grain size 8.8 – 8.9 μm can be used in light steel thin-walled (1.5 – 3.0 mm) structures in the operation temperature range of up to – 65°C.

Keywords: galvanized rolled light-gage steel; impact hardness; KCV; ferrite-perlite structure; size of ferrite grain; mechanical properties; critical temperature of brittleness; impact specimens.

Благодаря скорости и дешевизне изготовления легкие стальные тонколистовые конструкции (ЛСТК) из холодногнутых оцинкованных профилей толщиной 0,5 – 3,0 мм широко применяют в промышленности, в частности, в области строительной индустрии [1 – 7].

Согласно СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования», область применения стальных тонкостенных конструкций из стали марок 220 и 250 в неотапливаемых зданиях и сооружениях ограничивается расчетной температурой –55 °С. Допустимая область применения стали марок 300 и 350 по ГОСТ Р 52246 не указана. Еще более широкий перечень марок сталей с пределом текучести 390, 420 и 450 МПа содержит ГОСТ Р 52246, утвержденный 09.09.2016 г. Холоднокатаная тонколистовая оцинкованная сталь при изготовлении металлоконструкций в зонахгиба подвергается пластической деформации. С течением времени в этих зонах развивается деформационное старение [8 – 13]. Опасность трещинообразования в зонахгиба возрастает при использовании ЛСТК в северных регионах.

Ряд ученых подвергает сомнению опасность хрупкого разрушения тонкостенных конструкций. Они ссылаются на обстоятельную работу В. И. Трофимова и А. М. Каминского (ЦНИИПКС им. Мельникова, 1997 г.), согласно которой хрупкое разрушение не реализуется ввиду отсутствия в тонкостенных элементах объемного напряженного состояния растяжения. Аналогичной точки зрения придерживаются и авторы работы [14]. Такой подход, по существу, закреплен в российских стандартах. Так, согласно ГОСТ 27772–2015, испытания на ударный изгиб проката проводят при его номинальной толщине 5 мм и выше.

Однако в оцинкованной низколегированной стали толщиной 2 – 3 мм, предназначенной для тонколистовой конструкции, после наклепа и деформационного старения в диапазоне температур испытания от –55 до –70 °С происходит существенное снижение ударной вязкости KCV и доли вязкой составляющей в изломе [15]. При этом склонность к хрупкому разрушению контролируется размером зерна феррита, так что $KCU \sim 1/\sqrt{d^2}$, где KCU — ударная вязкость при нормативной температуре испытания; d — средний размер зерна феррита.

В связи с переходом при аттестации качества стали по хладостойкости от образцов с U-образным надрезом к образцам с V-образным надрезом представляют практический интерес результаты испытаний на ударную вязкость тонколистового оцинкованного проката.

Цель данной работы — исследование характеристик сопротивления хрупкому разрушению оцинкованных (275 мкм) элементов ЛСТК толщиной t , равной 3,0, 2,0 и 1,5 мм. Для определения радиусагиба профилей стояночного ($t = 3,0$ мм), направляющего ($t = 2,0$ мм) и прогона ($t = 1,5$ мм) использовали угломеры. Радиусыгиба устанавливали с учетом утонения сечения стенки элемента в зонегиба. Согласно данным выполненных измерений и расчета, величина пластической деформации во внешних волокнах составила 58, 48 и 46 % для толщин листового проката 3,0, 2,0 и 1,5 мм соответственно. В качестве характеристики пластической деформации использовали среднее значение деформации в срединной зоне растяжениягиба. В этой зоне существуют условия для создания трехосного напряженно-деформированного состояния, способствующего зарождению хрупкой трещины.

Таблица 1. Химический состав исследуемых профилей

Table 1. The chemical composition of the studied profiles

Исследованный объект	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo
Образец 1 (толщина 1,5 мм)	0,22	0,14	0,54	0,003	0,013	0,03	0,03	0,03	0,06	0,007	—
Образец 2 (толщина 2,0 мм)	0,17	0,11	0,49	0,014	0,012	0,04	0,03	0,06	0,04	0,006	—
Образец 3 (толщина 3,0 мм)	0,17	0,14	0,69	0,004	0,018	0,04	0,03	0,05	0,04	0,003	0,01
Сталь марки 350 (ГОСТ Р 52246)	≤0,25	—	≤0,05	≤0,04	≤0,04	—	—	—	—	—	—

Примечание. Для марок сталей 220 и 250 содержание углерода не более 0,22 % масс.

В этом случае в качестве пластической деформации использовали значения наклепа в срединном участке зоны растяжения, ограниченном наружным контуромгиба и нейтральной осью проката толщиной 3,0, 2,0 и 1,5 мм. Значения средней пластической деформации в зонегиба составили 29, 24 и 23 % соответственно. Химический состав исследованных тонколистовых профилей приведен в табл. 1.

Все исследованные профили по содержанию углерода соответствуют требованиям ГОСТ Р 52246 для марки 350. Стали отличаются повышенной чистотой по сере и примесям цветных металлов.

Исследуемые образцы имеют ферритно-перлитную структуру, вытянутую вдоль направления проката (рис. 1). Судя по структуре, в профилях прошла только полигонизация. Средняя твердость в листах толщиной 1,5, 2,0 и 3,0 мм составила 201, 186 и 227 HV_{10} соответственно. Механические свойства проката исследуемых толщин при растяжении удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 52246 (табл. 2). Наибольший уровень прочностных свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_B) имеет прокат толщиной 3,0 мм. Все профили обладают хорошей пластичностью $\delta = 26,2 - 30,9 \%$.

Испытания на ударный изгиб проводили на пакетных образцах с V-образным надрезом, суммарная толщина которых была не менее 3,0 мм, что обеспечивало согласно патенту на изобретение № 2655720 устойчивость образца при испытании. Соответственно, для испытания листов толщиной 1,5 мм с заданной выше степенью пластической деформации использовали три пластины размером $55 \times 8 \times 1,5$ мм, для испытания листов толщиной 2,0 мм — две пластины размером $55 \times 8 \times 2,0$ мм. Пластины толщиной 3,0 мм с V-образным надрезом не теряли устойчивости при испытании на ударный изгиб.

На рис. 2 приведены результаты испытаний на ударный изгиб. Видно, что при температурах испытания от -20 до -90 °C ударная вязкость KCV образцов толщиной 3,0 мм резко снижается. Заметно уменьшается значение KCV и для образцов толщиной 2,0 и 1,5 мм. Область снижения значений KCV в область более низких температур испытания сопровождается увеличением в изломе доли хрупкого транскристаллического излома и соответственно снижением доли вязкого разрушения (рис. 2, б, в).

С уменьшением толщины проката наблюдается существенное снижение ударной вязкости на верхнем шельфе ее значений (см. рис. 2, а, в). Одновременно происходит смещение зависимости KCV в сторону отрицательных температур. В результате критическая температура хруп-

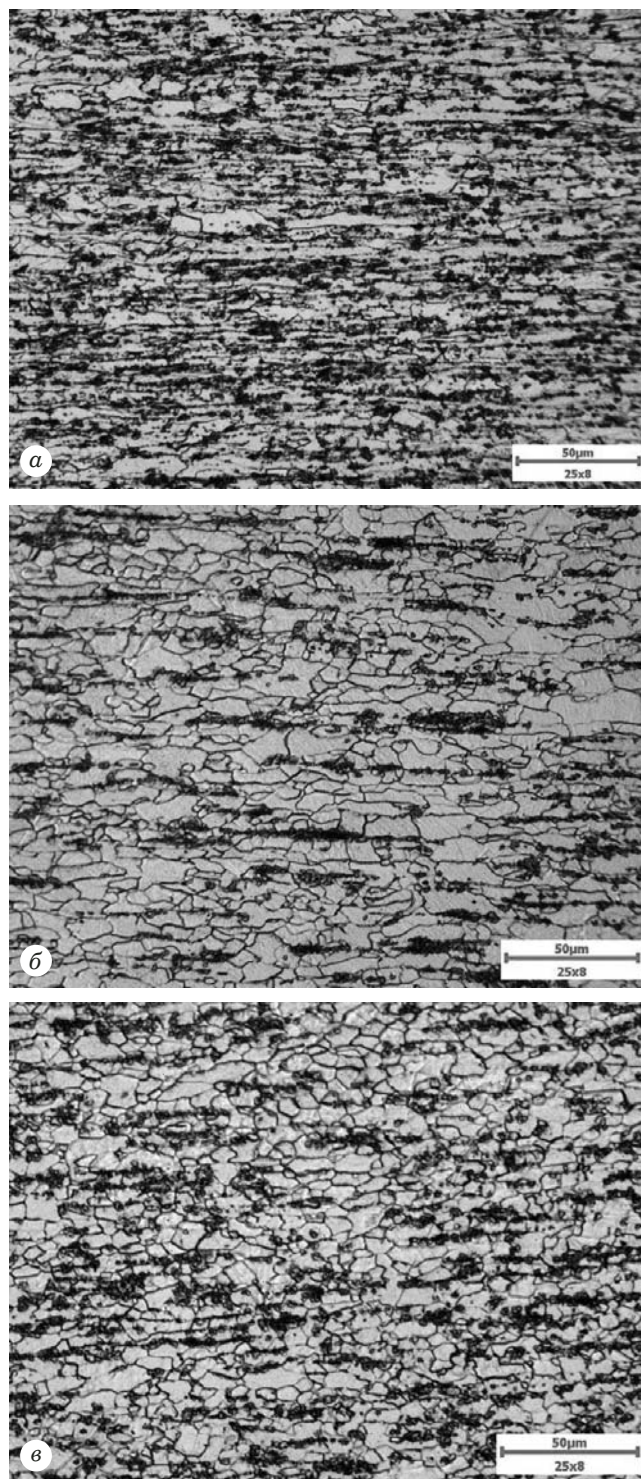


Рис. 1. Структура проката исследуемых профилей толщиной 3,0 (а), 2,0 (б) и 1,5 мм (в)

Fig. 1. The structure of rolled profiles 3.0 mm (a), 2.0 mm (b), and 1.5 mm (c) thick

кости T_{34} , при которой достигается условие $KCV = 34$ Дж/см², также сдвигается в область более низких температур испытания (табл. 3).

Поскольку размер зерна феррита в исследуемых профилях близок (8,0 – 8,9 мкм), то есть основания предполагать, что сдвиг кривых

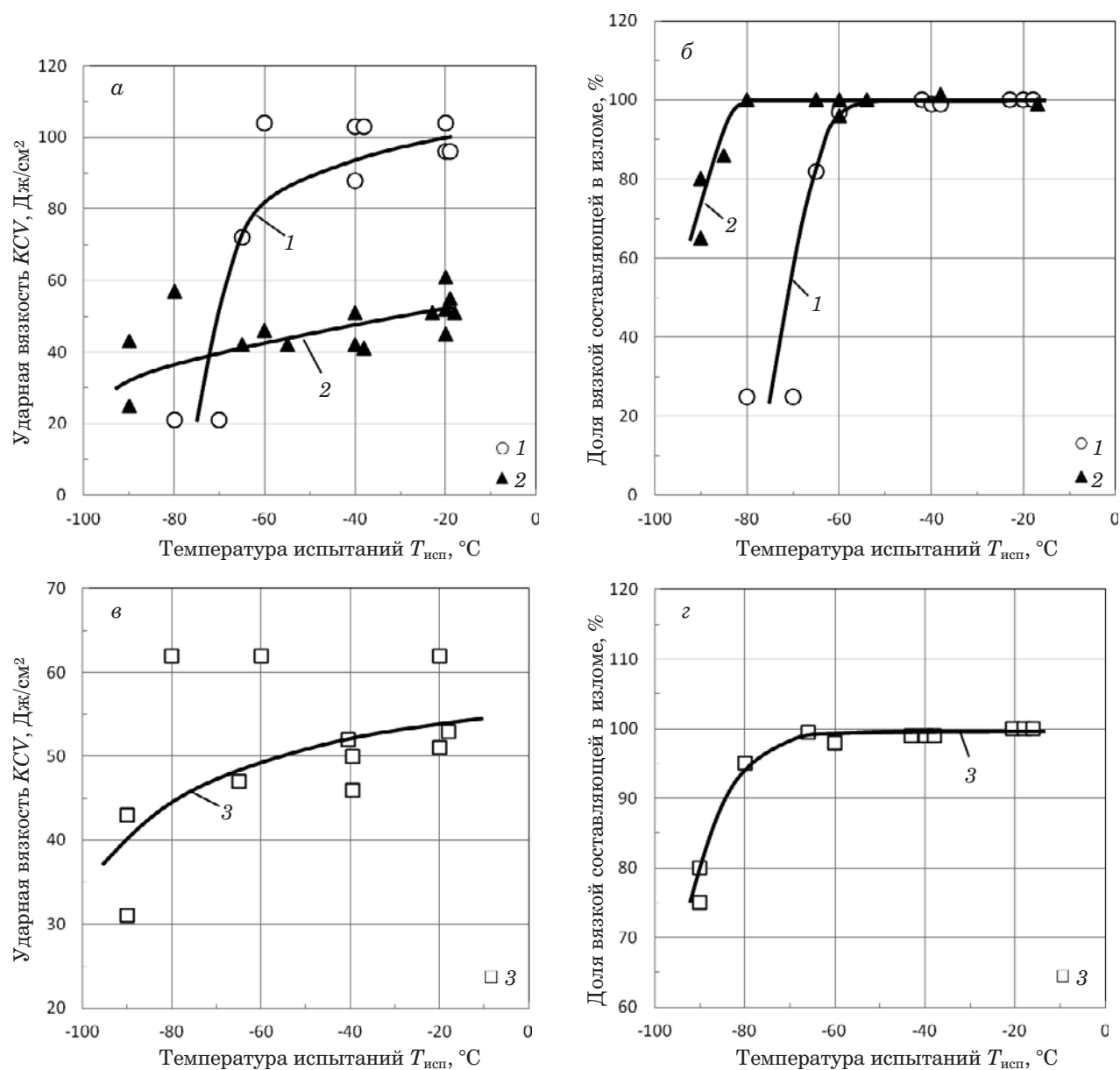


Рис. 2. Изменение ударной вязкости KCV (а, в) и доли волокна в изломе (б, г) для профилей толщиной 3,0 (1), 2,0 (2) и 1,5 мм (3) стали марки 350 по ГОСТ Р 52246 в зонегиба

Fig. 2. Change in the impact hardness KCV (а, в — and fiber fraction in the fracture (б, г) for steel 350 profiles 3.0 (1), 2.0 (2), and 1.5 (3) mm in the zone of bending

$KCV = f(T_{исп})$ в область более низких температур обусловлен уменьшением жесткости напряженно-деформированного состояния проката при растяжении образца (см. табл. 3). Следует ожи-

дать, что при укрупнении размера зерна феррита кривая $KCV = f(T_{исп})$ сдвинется в область положительных температур. При исследовании семи плавок тонколистового проката [15] установлено,

Таблица 2. Механические свойства оцинкованных профилей

Table 2. The mechanical properties of galvanized profiles

Исследуемый объект	Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ²	Предел текучести σ_T , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %
Профиль толщиной 3 мм	579	508	30,9
Профиль толщиной 2 мм	425	382	26,9
Профиль толщиной 1,5 мм	461	356	26,2
Сталь марки 350 (ГОСТ Р 52246)	≥420	≥350	≥16

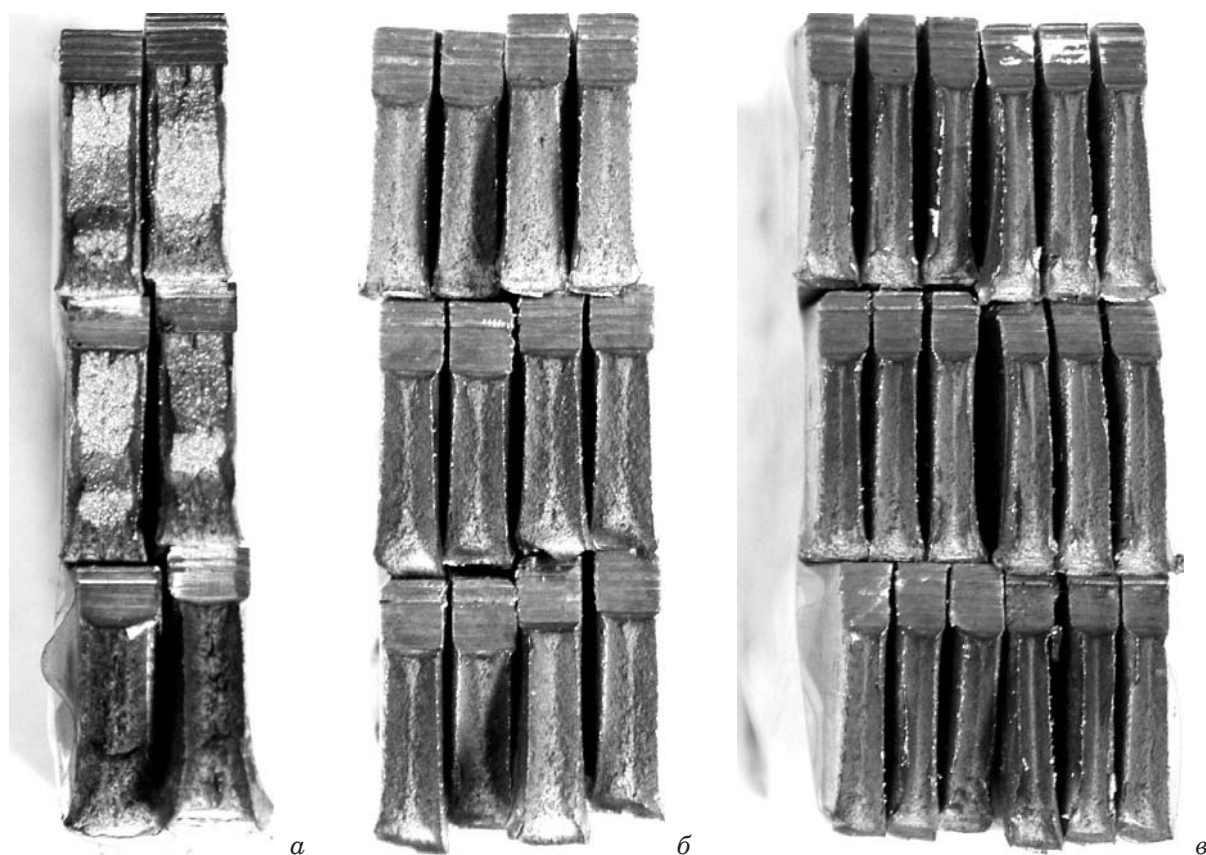


Рис. 3. Внешний вид изломов ударных образцов стали марки 350 толщиной 3,0 (а), 2,0 (б) и 1,5 мм (в)

Fig. 3. Fracture patterns of impact specimens of steel 350 3.0 (a), 2.0 (b), and 1.5 (c) mm

что четыре имели размер зерна феррита от 13,8 до 14,1 мкм.

Вязкохрупкий переход в профиле толщиной 3,0 мм происходит с образованием участков с кристаллическим строением, поверхность разрушения которых ориентирована нормально растягивающим напряжением (рис. 3, а). В профилях толщиной 2,0 и 1,5 мм поверхность разрушения образована зонами сдвига, ориентированными под углом 45° к поверхности образца (рис. 3, б, в).

«Островки» (группа фасеток) хрупкого кристаллического разрушения располагаются в основании губ среза (сдвига) и зоны долома. Наиболее интенсивно возрастает доля хрупкой составляющей в изломе при снижении температуры испытания в зоне долома. Таким образом, в стали

марки 350 с размером зерна феррита 8,0 – 8,9 мкм вязкохрупкий переход реализуется при снижении температуры испытания от –20 до –90 °С. Критическая температура хрупкости стали T_{34} снижается при уменьшении толщины проката от 3,0 до 1,5 мм.

Выводы

1. Тонколистовая оцинкованная сталь (0,17 – 0,22 С, 0,11 – 0,14 Si, 0,49 – 0,69 % масс. Mn) в полигонизационном состоянии имеет ферритно-перлитную структуру с мелким (8,0 – 8,9 мкм) зерном феррита, соответствуя марке 350 по ГОСТ Р 52246.

Таблица 3. Значение критических температур хрупкости T_{34}

Table 3. The critical temperature of brittleness T_{34}

Объект исследования	Степень пластической деформации	Размер зерна феррита d , мкм	$T_{исп}$, °С	Примечание
Прокат толщиной 3,0 мм после деформационного старения	29	8,0	–74	—
Прокат толщиной 2,5 мм после деформационного старения	24	8,9	–88	—
Прокат толщиной 1,5 мм после деформационного старения	23	8,0	–96	Значение получено интерполяцией

2. Ударная вязкость KCV стали марки 350 в зонахгиба элементов ЛСТК в диапазоне температур испытания от -20 до -90 °C имеет температурную зависимость, свойственную тонколистовому прокату ферритно-перлитной стали. Поэтому при толщинах листа 3,0, 2,0 и 1,5 мм критическая температура хрупкости T_{34} достигает -74 , -88 и -96 °C соответственно. При близких значениях размера зерна феррита (8,0 – 8,9 мкм) это указывает на существенное влияние жесткости напряженно-деформированного состояния при растяжении на положение вязкохрупкого перехода в тонколистовом прокате.

3. Исследуемые оцинкованные профили марки 350 по ГОСТ Р 52246, имеющие средний размер зерна феррита 8,0 – 8,9 мкм, пригодны к применению в ЛСТК толщиной 1,5 – 3,0 мм при температурах эксплуатации вплоть до -65 °C. Возможность применения в ЛСТК проката, имеющего средний размер зерна феррита более 8,9 мкм, требует дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айрумян Э. Л., Ларичев А. В. Несущая способность навесной фасадной системы с каркасом из стальных холодногнутых профилей (по результатам испытаний) / Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2019. № 3(40). С. 35 – 39.
2. Корнилов Т. А., Никифоров А. Ю. Теплозащита малоэтажных зданий из легких стальных тонкостенных конструкций / Инженерно-строительный журнал. 2018. № 8. С. 140 – 149.
3. Корнилов Т. А., Герасимов Г. Н. Наружные стены малоэтажных зданий из легких стальных тонкостенных конструкций для условий Крайнего Севера / Жилищное строительство. 2016. № 6. С. 20 – 24.
4. Советников Д. О., Виденков Н. В., Трубина Д. А. Легкие стальные тонкостенные конструкции в многоэтажном строительстве / Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3(30). С. 152 – 165.
5. Айрумян Э. Л., Каменщиков Н. И., Румянцева И. А. Особенности расчета монолитных плит сталежелезобетонных плит по профилированному стальному настилу / Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 21 – 25.
6. Santos P., Martinc C., Simo es da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flaking thermal losses / Journal of Building Physics. 2014. N 38(1). P 81 – 98.
7. Naji S., Celik O. C., Alengaram U. J., Jumaat M. Z., Shamshirband S. Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings / Energy and buildings. 2014. N 84. P 727 – 739.
8. Фарбер В. М., Селиванова О. В., Хотинков В. А. Деформационное старение в сталях. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 193 с.
9. Ермаков Б. С., Шапошников Н. О. Влияние технологических факторов на формирование свойств металла труб магистральных нефтепроводов / Металлург. 2018. № 8. С. 39 – 45.
10. Одесский П. Д., Ведяков И. И. Сталь в строительных металлических конструкциях. — М.: Металлургиздат. 2018. 906 с.
11. Одесский П. Д. Развитие подходов к оценке сопротивления разрушению стали для строительных металлических конструкций и современные стандарты / Деформация и разрушение материалов. 2018. № 1. С. 29 – 41.
12. Частухин А. В., Рингинен Д. А., Эфрон Л. И. и др. Разработка моделей структурообразования аустенита для совершенствования стратегий горячей прокатки трубных сталей / Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 3. С. 39 – 53.
13. Горицкий В. М. Применение характеристик ударной вязкости в инженерной практике. — М.: Металлургиздат, 2016. — 304 с.
14. Одесский П. Д., Ведяков И. И. Сталь в строительных металлических конструкциях Ч. 14. Холоднодеформированные стали в металлических конструкциях. — М.: НИЦ «Строительство», 2016. — 47 с.
15. Горицкий В. М., Кулемин А. М., Силина Н. Г. Структура и механические свойства холоднодеформированного тонколистового оцинкованного проката для легких стальных конструкций / Деформация и разрушение материалов. 2018. № 6. С. 26 – 31.

REFERENCES

1. Airumyan E. L., Larichev A. V. Bearing capacity of a hinged facade system with a frame made of cold-formed steel profiles (according to test results) / Prirod. Tekhnogen. Riski. Bezopasn. Sooruzh. 2019. N 3(40). P. 35 – 39 [in Russian].
2. Kornilov T. A., Nikiforov A. Yu. Thermal protection of low-rise buildings of light steel thin-walled structures / Inzh.-Stroit. Zh. 2018. N 8. P. 140 – 149 [in Russian].
3. Kornilov T. A., Gerasimov G. N. External walls of low-rise buildings of light steel thin-walled structures for the conditions of the Far North / Zhil. Stroit. 2016. N 6. P. 20 – 24 [in Russian].
4. Sovetnikov D. O., Vidyakov I. I., Trubina D. A. Light steel thin-walled structures in multi-storey construction / Stroit. Unikal'n. Zd. Sooruzh. 2015. N 3(30). P. 152 – 165 [in Russian].
5. Airumyan E. L., Kamenshchikov N. I., Rumyantseva I. A. Features of the calculation of monolithic slabs of steel-reinforced concrete slabs on profiled steel flooring / Promyshl. Grazhd. Stroit. 2015. N 9. P. 21 – 25 [in Russian].
6. Santos P., Martinc C., Simo es da Silva L. Thermal performance of lightweight steel framed wall: the importance of flaking thermal losses / Journal of Building Physics. 2014. N 38(1). P. 81 – 98.
7. Naji S., Celik O. C., Alengaram U. J., Jumaat M. Z., Shamshirband S. Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings / Energy and buildings. 2014. N 84. P. 727 – 739.
8. Farber V. M., Selivanova O. V., Khotinov V. A. Deformation aging in steels. — Yekaterinburg: Izd. Ural. Gos. Univ., 2018. P. 153. — 193 p. [in Russian].
9. Ermakov B. S., Shaposhnikov N. O. The influence of technological factors on the formation of metal properties of pipes of oil pipelines / Metallurg. 2018. N 8. P. 39 – 45 [in Russian].
10. Odessky P. D., Vedyakov I. I. Steel in building metal structures. — Moscow: Metallurgizdat, 2018. — 906 p. [in Russian].
11. Odessky P. D. Development of approaches to the assessment of steel fracture resistance for building metal structures and modern standards / Deform. Razrush. Mater. 2018. N 1. P. 29 – 41 [in Russian].
12. Chastukhin A. V., Ringinen D. A., Efron L. I., et al. Development of models of austenite structure formation for improving strategies of hot rolling of tubular steels / Probl. Chern. Metallurg. Materialoved. 2016. N 3. P. 39 – 53 [in Russian].
13. Goritsky V. M. Application of impact toughness characteristics in engineering practice. — Moscow: Metallurgizdat, 2016. — 304 p. [in Russian].
14. Odessky P. D., Vedyakov I. I. Steel in building metal structures. Part 14. Cold-deformed steels in metal structures. — Moscow: NITs "Stroitel'stvo", 2016. — 47 p. [in Russian].
15. Goritsky V. M., Kulemin A. M., Silina N. G. The structure and mechanical properties cold-formed thin-walled profiles for light steel thin-walled structures / Deform. Razrush. Mater. 2018. N 6. P. 26 – 31 [in Russian].