

УДК 669.015-194.2:621.785

## МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

ПОГРЕБНАЯ Н. Э.<sup>1</sup>, к. т. н., проф.,  
 КУЦОВА В. З.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
 КОВЗЕЛЬ М. А.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.,  
 СТЕЦЕНКО А. П.<sup>4\*</sup>, асс.

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [kovzel.maxim@gmail.com](mailto:kovzel.maxim@gmail.com)

<sup>4\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [ploshenko90@gmail.com](mailto:ploshenko90@gmail.com)

**Аннотация. Постановка проблемы.** В качестве материала для настоящего исследования выбраны комплекснолегированная высокопрочная бейнитная сталь 14X2ГМР и сталь ВСтЗсп обычного качества. Исследование стали ВСтЗсп обусловлено тем, что в настоящее время она является наиболее широко используемым в строительстве материалом, поэтому применение термической и термомеханической обработки позволило повысить однородность структуры и показатели прочностных характеристик. Низкое содержание легирующих элементов (до 4 % в сумме) обеспечивает удовлетворительную свариваемость и относительно невысокую стоимость металлоконструкций. Поэтому использование отечественного конкурентоспособного высокопрочного металлопроката на внутреннем строительном рынке, является экономически целесообразным, а также снизит зависимость отрасли от зарубежных стран – импортеров металла. В работе проведен обобщенный обзор наиболее часто встречающихся механизмов разрушения низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей. Рассмотрено влияние параметров структуры (типа, формы, размера, распределения частиц второй фазы, неметаллических включений и величины зерна) на зарождение и распространение трещин. Определение сущности процессов и условий формирования того или иного структурного элемента поверхности излома открывает перспективу надежной инспекции изломов, разрушившихся элементов металлических строительных конструкций. **Выводы.** Проведена идентификация наиболее часто встречающихся изломов на основе процессов деформации и разрушения.

*Ключевые слова:* конструкционная сталь; металлоконструкции; фрактограммы излома; хрупкое разрушение

## МЕХАНІЗМИ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕЙ

ПОГРЕБНА Н. Е.<sup>1</sup>, к. т. н., проф.,  
 КУЦОВА В. З.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
 КОВЗЕЛЬ М. А.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.,  
 СТЕЦЕНКО Г. П.<sup>4\*</sup>, асист.

<sup>1</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>3</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [kovzel.maxim@gmail.com](mailto:kovzel.maxim@gmail.com)

<sup>4\*</sup> Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [ploshenko90@gmail.com](mailto:ploshenko90@gmail.com)

**Анотація. Постановка проблеми.** За матеріал для даного дослідження вибрано комплекснолеговану високоміцну бейнітну сталь 14X2ГМР та сталь ВСтЗсп звичайної якості. Дослідження сталі ВСтЗсп зумовлене тим, що вона є матеріалом, який широко використовується у будівництві, тому застосування термічної та термомеханічної обробки дозволило підвищити однорідність структури і показники міцнісних характеристик. Низький вміст легуючих елементів (до 4 % у сумі) забезпечує задовільну зварюваність та відносно невисоку вартість металлоконструкцій. Тому використання

вітчизняного конкурентоздатного високоміцного металопрокату на внутрішньому будівельному ринку, економічно доцільне, а також понизить залежність галузі від зарубіжних країн – імпортерів металу. Проведено узагальнений огляд механізмів руйнування, що найчастіше зустрічаються, низьковуглецевих та низьколегованих конструкційних сталей. Розглянуто вплив параметрів структури (типу, форми, розміру, розподілу частинок другої фази, неметалевих включень і величини зерна) на зародження і поширення тріщин. З'ясування суті процесів та умов формування того або іншого структурного елемента поверхні зламу відкриває перспективу надійної інспекції зламів, елементів металевих будівельних конструкцій, що зруйнувалися. **Висновки.** Проведено ідентифікацію зламів, що найчастіше зустрічаються, на основі процесів деформації та руйнування.

*Ключові слова:* конструкційна сталь; металокопункції; фрактограми зламу; крихке руйнування

## FRACTURE MECHANICS OF THE CONSTRUCTIONAL BUILDING STEEL

POGREBNAYA N.E.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KUTSOVA V.Z.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KOVZEL M.A.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
STETSENKO A.P.<sup>4\*</sup>, *Postgrad.*

<sup>1</sup> Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [kaf.material@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.material@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>2</sup> Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

<sup>3</sup> Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [kovzel.maxim@gmail.com](mailto:kovzel.maxim@gmail.com)

<sup>4\*</sup> Department of Material Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(0562) 47-42-49, e-mail: [ploshenko90@gmail.com](mailto:ploshenko90@gmail.com)

**Abstract. Formulation of the problem.** Complex alloyed high-strength bainitic steel 14X2ГМР and normal quality ВСт3сп were chosen for this study. Steel ВСт3сп were chosen due to the fact that it is currently the most widely used material in the construction. By the use heat treatment and thermomechanical treatment, we can increase the uniformity of the structure and mechanical characteristics. The low content of alloying elements (up to 4 % in total) provides satisfactory weldability and the relatively low cost of steel construction. Therefore, the use of the local high competitive rolled metal in the local construction market, is economically viable, as well as reduce the dependence of industry on foreign countries – the importers of metal. Presented results provides generalized overview of the most common fracture mechanisms for the low-carbon and low-alloyed constructional steels. The influence of the structure parameters (type, shape, size, distribution of second phase particles, inclusions and grain size) on the nucleation and propagation of the cracks were studied. **Objective.** Understanding the nature of the processes and conditions for the structural element formation on the fracture surface give us opportunity for reliable inspection breaks and fracture of the metal constructions elements. **Conclusions.** Were identified and described the most common fractures based on the deformation and fracture processes.

*Keywords:* constructional steel; steel construction; fracture photomicrograph; brittle fracture

### Введение

Разрушение образцов, деталей машин или элементов конструкций происходит по последовательно протекающим механизмам разрушения. Комбинация механизмов зависит от химического состава сталей, термической обработки, режимов нагружения, схемы напряженного состояния и т. д.

Термомеханическая обработка (ТМО) относится к числу наиболее эффективных способов воздействия на структуру с целью получения параметров структуры и субструктуры, обуславливающих высокий комплекс механических свойств сталей и сплавов. Наибольший эффект от применения ТМО вызывает формирование в сталях ячеистой структуры с минимальным размером ячеек. После ТМО структура мартенсита отличается большей

дисперсностью пластинок реечного мартенсита, большей плотностью и более равномерным распределением дислокаций, а также повышенной дисперсностью карбидов. Термомеханическая обработка (ТМО) способствует изменению микромеханизма разрушения – переходу от транскристаллитного хрупкого скола к вязкому чашечному.

### Материал и методы исследования

В работе исследовали стали ВСт3сп и 14X2ГМР. Для получения в сталях различных структурных состояний карточки подвергали термическому и термомеханическому упрочнению.

Термомеханическое упрочнение заключалось в нагреве сталей до температуры аустенизации 950...1 000 °С ( $\tau_{\text{ауст}} = 30$  мин.), охлаждении в воде со скоростью  $\sim 60$  °С/с (бак со спокойной водой) и

~ 100 °С/с (камерное устройство). Температурно-скоростной режим закалки в потоке прокатного стана выдерживался следующим: температура аустенитизации 950...1000 °С, температура начала прокатки 900...920 °С, скорость прокатки 6,04 м/с, степень деформации аустенита в валках стана 15...20 % за один проход. Немедленная закалка осуществлялась в камерном устройстве конструкции ИЧМ НАН Украины с избыточным давлением воды 4 атм. Из карточек изготавливали образцы на ударный изгиб, проводили их испытание на маятниковом копре PSW – 30 при температуре от +20 до –100 °С, при этом оценивали долю вязкой составляющей и характер излома на растровом электронном микроскопе РЭМ-100 У при увеличении 1,5 до 10 000 раз, что позволило интерпретировать особенности строения изломов.

### Результаты исследования

Изменение микромеханизма разрушения по ходу продвижения трещины по сечению образца обусловлено получением большого спектра фрактограмм изломов низкоуглеродистой стали ВСтЗсп и низколегированной бейнитной стали 14Х2ГМР после улушения и термомеханической

обработки. Исследуемые стали – промышленного производства, поэтому в них содержатся промежуточные соединения и неметаллические включения, которые выполняют роль упрочняющих фаз, располагаясь в виде островков по направлению деформации.

Направление локального фронта разрушения можно определить по форме фасеток – они вытянуты в направлении развития разрушения. Заметно изменяется направление локального разрушения при переходе из одного зерна в другое, на изломе образуются ступеньки.

Использование электронной микроскопии и фрактографии позволило предположить, что величина фасетки внутреннего скола соответствует величине мартенситного пакета. Сталь 14Х2ГМР после ТМО и отпуска имеет меньшую величину фасеток внутризеренного микроскола, поскольку бейнитные пакеты более мелкие по сравнению с мартенситными. Уровень хрупкой прочности стали 14Х2ГМР превышает напряжение микроскола стали ВСтЗсп. Она имеет также более мелкое исходное аустенитное зерно и, соответственно, размеры пакетов мартенсита, следовательно, более высокое сопротивление хрупкому отрыву (табл. 1).

Таблица 1

### Средний диаметр зерна и размер мартенситных пакетов в стали 14Х2ГМР / Average grain diameter and martensite package size in steel 14Х2ГМР

| Вид обработки    | Средний диаметр зерна аустенита, мкм | Размер пакетов, мкм |
|------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Закалка          | 31,0                                 | 10,0                |
| Закалка + отпуск | 41,0                                 | 18,0                |
| ТМО              | 17,9                                 | 9,0                 |
| ТМО + отпуск     | 22,0                                 | 8,0                 |

На рисунке 1 показана зона зарождения трещины (область 1) с фасетками кристаллографического сдвига в очаге зарождения трещины, зона стабильного роста трещины (область 2) в ней находятся фасетки межзеренного разрушения и зона долома (область 3), образуемая фасетками хрупкого скола.

Работа разрушения материала существенно зависит от действующего микромеханизма разрушения. Наименьший уровень эффективной поверхностной энергии  $\gamma_{эфф} = 10^3 \dots 10^4$  эрг/см<sup>2</sup> наблюдается при межзеренном и транскристаллитном хрупком разрушении сколом.

Транскристаллитный хрупкий скол характерен для статического нагружения, а в усталостных изломах скол преобладает в зоне долома.

Чаще всего зарождение хрупких трещин скола связывают [1]:

- со слиянием дислокаций, скапливающихся у границ зерен;
- с пересечением двух полос скольжения с образованием трещины скола;
- с пересечением механических двойников;
- с растрескиванием хрупкой второй фазы.

Для скола характерны небольшая деформация у вершины трещины. В конструкционных сталях скорость распространения трещины приравнивается к 2 000 м/с. Скол является макрорупким разрушением с низким уровнем работы разрушения.

На рисунке 2 представлены типичный «ручьистый узор», указывающий на направление и распространение скола (рис. 2 а), и язычки скола (рис. 2 б).

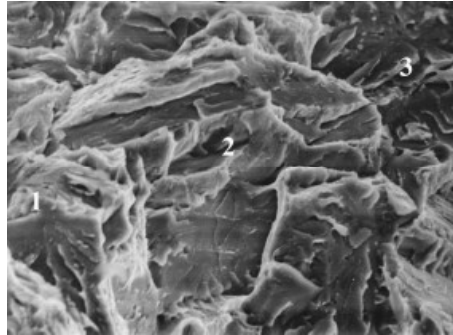
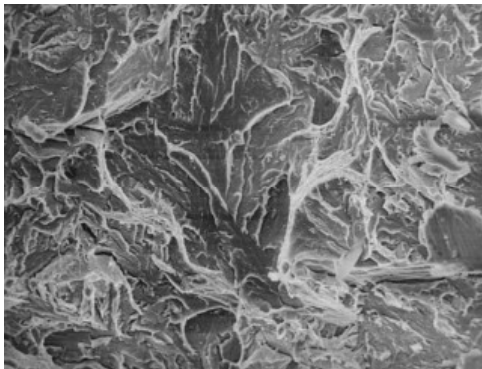


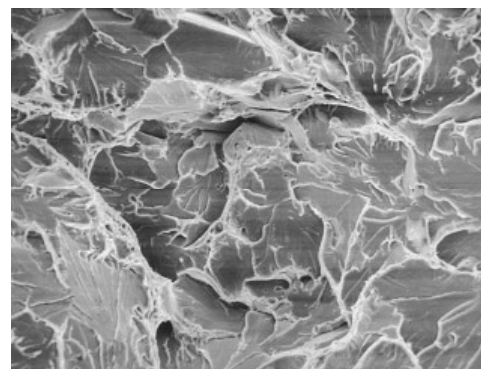
Рис. 1. Фрактограмма поверхности излома стали 14X2ГМР (ТМО + отпуск 550 °С,  $t_{исп} = -100$  °С),  $\times 1500$ : 1 – область зарождения трещины; 2 – область стабильного роста трещины; 3 – область долома  
/ Fig. 1. Fracture photomicrograph surface steel of the 14X2GMP,  $\times 1500$  (TMP + temper 550 °С, fracture test temperature =  $-100$  °С),  $\times 1500$ : 1 – the area of crack initiation; 2 – the region of stable crack growth; 3 – the area of doloma

Возникновение ступенек скола связывают с разрушением металла между двумя расположенными на параллельных уровнях трещинами скола, небольшие ступеньки могут образовываться в

результате пересечения трещиной винтовых дислокаций. На образование ступенек влияют границы зерен, они изменяют плоскость разрушения и способствуют образованию ступенек скола.



а

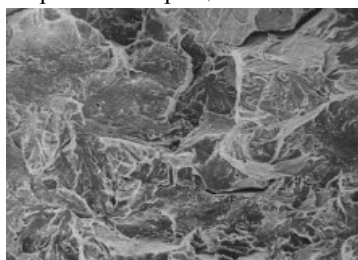


б (b)

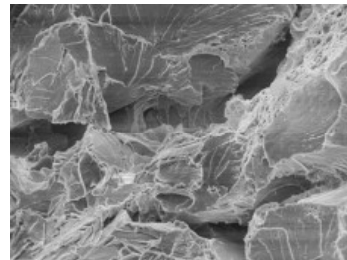
Рис. 2. Разрушение бейнитной конструкционной стали по микромеханизму хрупкого транскристаллитного скола,  $\times 800$  / Fig. 2. Fracture of the bainitic constructional steel by the brittle transcrystalline shear micromechanism,  $\times 800$

Для квазискола (рис. 3) характерен механизм разрушения основанный на зарождении и последующем слиянии небольших субмикротрещин (рис. 3 а) в макротрещину (рис. 3 б). Закаленные на мартенсит низкоуглеродистые конструкционные стали чаще всего имеют склонность к квазисколу. Направление распространения трещины в пакете

мартенсита состоит из отдельных участков, которые часто не имеют кристаллографической ориентировки типа  $\{100\}$ , характерной для хрупкого транскристаллитного скола. Эти участки параллельны одной или нескольким плоскостям с малыми индексами.



а



б (b)

Рис. 3. Разрушение термоупрочненной бейнитной стали 14X2ГМР по микромеханизму квазискола (а) и расслоения (б),  $\times 1500$  / Fig. 3. Fracture of the bainitic heat treated constructional steel 14X2GMP by the quasi-spalling micromechanism (a) and lamination (b),  $\times 1500$

Для вязкого чашечного разрушения характерно протекание в процессе разрушения интенсивной пластической деформации (рис. 4).

Чашечки бывают равновесные и параболические с определенной степенью вытянутости вдоль одного из направлений. Форма чашечек зависит от напряженного состояния у вершины трещины. На дне чашечек видны включения, которые, вероятно, способствуют зарождению пор.

В таблице 2 приведен количественный анализ среднего диаметра чашечек для исследуемых сталей после улучшения. Средний диаметр чашечек у стали 14Х2ГМР значительно (на 72 %) меньше, чем в улучшенном состоянии у стали ВСт3сп. При этом характер излома более однороден по размеру чашечек – около 73 % имеют минимальные размеры (0,066 мкм), в то время как в улучшенном состоянии на их долю приходится только 15 % от общего числа.

В зависимости от того, как ориентируется в структуре поверхность разрушения, различают внутризеренное и межзеренное чашечное разрушение (рис. 5).

Вязкое межзеренное разрушение наблюдается у структуры отпущенного мартенсита, поскольку для отпущенного мартенсита вдоль границ бывших аустенитных зерен расположены крупные выделения частиц карбидов. Следовательно, распространение трещины происходит из-за зарождения и роста пор вдоль границ зерен.

Вязкий скол (расслоение или расщепление) чаще всего наблюдается по плоскостям скольжения, о чем свидетельствуют большие гладкие участки на поверхности излома. Такой вид излома характерен для листового металлопроката низкоуглеродистых конструкционных сталей, когда плоскость надреза образцов для испытаний на ударную вязкость совпадает с плоскостью листа. На поверхности излома наблюдаются участки с сильно вытянутыми чашечками. Согласно ряду работ [1–3], на некоторых участках расслоения металла по плоскостям скольжения происходит ослабление связей после пластической деформации.

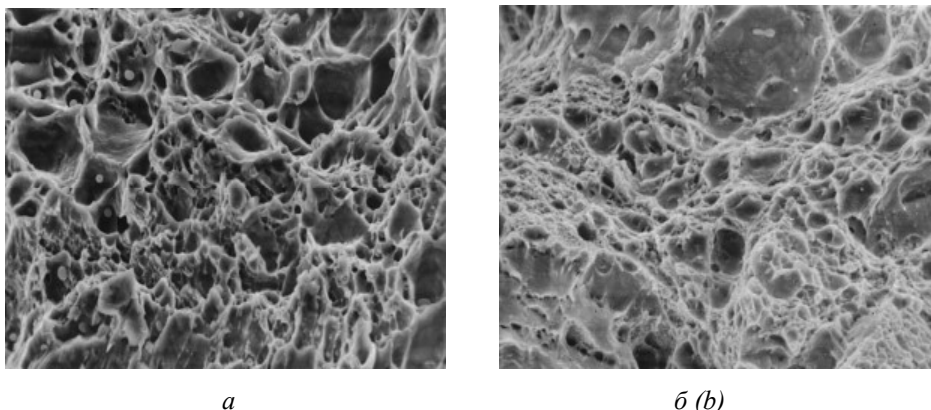


Рис. 4. Микрофрактограмма чашечного разрушения в стали 14Х2ГМР (ТМО + отпуск 650 °С,  $t_{исп} = +20$  °С),  $\times 1\,500$  / Fig. 4. Fracture photomicrograph of the cup fracture in 14X2GMP steel (TMP + temper 650 °С, fracture test temperature = +20 °С),  $\times 1\,500$

Таблица 2

Средний диаметр чашечек исследуемых сталей после закалки и отпуска / Average cup diameter of the investigated steel after quenching and tempering

| Марка стали<br>Вид обработки               | Средний диаметр чашечек, $d_{ср}$ , мкм | Диаметр чашечек, мкм |                        |                 |                        |
|--|---|----------------------|------------------------|-----------------|------------------------|
|  |   | $d_{max}$ , мкм      | Содержание в изломе, % | $d_{min}$ , мкм | Содержание в изломе, % |
| ВСт3сп<br>Закалка +<br>отп. 550 °С, 1 час  | 0,266                                   | 0,66                 | 2,0                    | 0,066           | 15,0                   |
| 14Х2ГМР<br>Закалка +<br>отп. 650 °С, 1 час | 0,193                                   | 1,86                 | 0,7                    | 0,066           | 70,0                   |

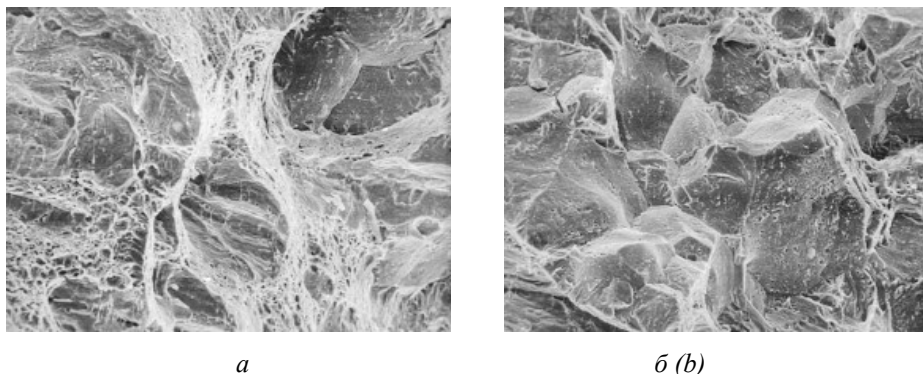


Рис. 5. Межзеренное хрупкое разрушение бейнитной конструкционной стали 14X2ГМР (закалка + отпуск 650 °С,  $t_{ДСП} = -100$  °С),  $\times 1\,500$  / Fig. 5. Intergrain brittle fracture of the bainitic constructional steel 14X2ГМР (quenching and temper 650 °С, fracture test temperature = -100 °С),  $\times 1\,500$

На поверхности расщепления (рис. 6) появляются осколочные вырывы, что свидетельствует о присутствии вторичных трещин. Присутствие плоскостей сдвигового расщепления характерно для квазиотрыва. В ряде исследований [4; 5] указывается, что причиной расслоения могут быть

неметаллические включения, большие по размеру и плоские по форме, расположенные в плоскостях прокатки. В плоскостях скольжения при деформации скапливается повышенная плотность дислокаций, что приводит к появлению трещин.

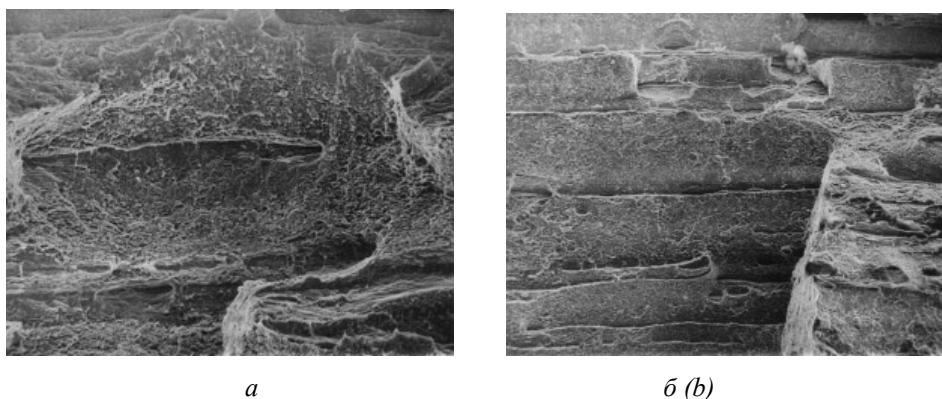


Рис. 6. Расслоения по плоскостям скольжения в листовом металлопрокате, низкоуглеродистой конструкционной стали ВСт 3сп (после закалки и отпуски 550 °С,  $t_{ДСП} = +20$  °С): а -  $\times 1\,500$ ; б -  $\times 500$  / Fig. 6. Lamination on the slip planes in the sheet metal, low carbon constructional steel ВСт 3сп (quenching and temper 550 °С, fracture test temperature = +20 °С): а -  $\times 1\,500$ ; б -  $\times 500$

Неметаллические включения могут инициировать появление дислокаций, которые способствуют передаче пластической деформации от зерна к зерну или облегчают зарождение на границе зерна микротрещины.

### Выводы

Определена последовательность разрушения: в первую очередь возникают микронадрывы упрочняющих фаз возле границ зерен, скоплений дислокаций, т. е. резких структурных концентраторов. По мере роста деформации поры вокруг этих частиц растут, а микрорельеф излома зависит от размера исходного зерна аустенита,

который является основным показателем вязкого разрушения. При ТМО происходит измельчение тонкой структуры, заключающейся в уменьшении размера пакетов мартенсита и увеличении их количества.

Следовательно, при большом количестве дислокационных скоплений рост пор ограничивается вследствие пересечения с поверхностями соседних пор. В изломах после ТМО характерны как малые по протяженности и глубокие чашечки, так и малые по величине фасетки, что свидетельствует о благоприятном сочетании высокой прочности и вязкости стали.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванова В. С. Разрушение металлов : монография / В. С. Иванова. – Москва : Metallurgiya, 1979. – 168 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/1043950/>
2. Структурная теория упрочнения конструкционных сталей и других материалов : монография / [В. И. Большаков, Л. И. Тушинский]. – Днепропетровск : Издательство «Свидлер А. Л.», 2010. – 484 с. – Режим доступа: [http://ciu.nstu.ru/kaf/mm/nauchnaya\\_deyatelnost/monograflist\\_new](http://ciu.nstu.ru/kaf/mm/nauchnaya_deyatelnost/monograflist_new)
3. Растровая электронная микроскопия. Разрушение : справочное издание / Л. Энгело, Г. Клингеле. – Москва : Metallurgiya, 1986. – 232 с. – Режим доступа: <http://www.exlit.ru/bb431839962.html>
4. Котречко С. А. Параметры микроструктуры, контролирующей хрупкую прочность малоуглеродистых сталей со структурой мартенсита отпуска / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, Р. В. Телевич // Металлофизика и новейшие технологии. – 2004. – 26, № 4. – С. 435–456. – Режим доступа: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/browse.html>
5. Механическая стабильность металлов и сплавов : монография / [Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, И. В. Шиян]. – Киев : Наукова думка, 2014. – 277 с. – Режим доступа: <http://www.nbu.gov.ua/sites/default/files/eif0000053.pdf>

## REFERENCES

1. Ivanova V.S. *Razrusheniye metallov* [Fracture of metal]. Moscow : Metallurgy, 1979. – 168 p. (in Russian)
2. Bolshakov V.I. and Tushino L.I. *Strukturnaya teoriya uprochneniya konstruktsionnykh staley y druhykh materialov* [Structural theory of hardening of structural steels and other materials.] Dnepropetrovsk : «Svydler A.L.», 2010, 484 p. (in Russian)
3. Engelo L. and Klingele G. *Rastrovaya elektronnyaya mikroskopiya. Razrusheniye* [Scanning electron microscopy. Fracture]. Moscow : Metallurgiya, 1986, 232 p. (in Russian)
4. Kotrechko S.A., Meshkov Y.Y. and Televich R.V. *Parametryi mikrostrukturyi, kontroliruyuschie hrupkuyu prochnost malouglerodistyih staley so strukturoy martensita otpuska* [Microstructure parameters that control the brittle strength of the low-carbon steels with martensite structure]. *Metallofizika i noveyshie tehnologii* [Metallophysics and newest technologies]. 2004, 26, no. 4, pp. 435–456. (in Russian)
5. Meshkov Y.Y., Kotrechko S.A. and Shiyani I.V. *Mekhanicheskaya stabilnost metallov i splavov* [Mechanical stability and metal alloys]. Kyiv . Naukova dumka, 2014, 277 p. (in Russian)

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. А. Ф. Саниным (Украина), д-ром техн. наук, проф. В. Д. Лаухиным (Украина).*

Поступила в редколлегию 05.02.2017

Принята в печать 10.02.2017