

УДК 669.14.018.29:669-176:620.17

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И ОРИЕНТАЦИИ ОБРАЗЦОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 10ХСНД ПРИ УДАРНОМ И СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ<sup>1</sup>

©2024 г. Л.Р. Ботвина<sup>1\*</sup>, М.Р. Тютин<sup>1\*</sup>, Ю.А. Демина<sup>1\*</sup>, Е.Н. Белецкий<sup>1\*</sup>,  
Г.А. Куницын<sup>2\*</sup>, Д.В. Нижельский<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

E-mail: lbotvina@imet.ac.ru

<sup>2\*</sup>АО «Уральская Сталь», Новотроицк

Поступила в редакцию 4 апреля 2024 г.

После доработки 30 апреля 2024 г. принята к публикации 13 мая 2024 г.

Исследовано влияние технологии обработки стали 10ХСНД и ориентации нагрузки по отношению к направлению прокатки на ударную вязкость, динамическую трещиностойкость, температуру вязко-хрупкого перехода и механизмы разрушения. Сталь изучали в двух состояниях — после термической обработки закалкой с отпуском (ТО) и после контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением (КП + УО). Показано, что для стали после КП + УО характерно повышение критической температуры хрупкости, наиболее выраженное для поперечно ориентированных образцов, и появление значительной анизотропии величины ударной вязкости. На поверхностях разрушения образцов на ударный изгиб после КП + УО выявлены многочисленные расслоения вдоль текстуры прокатки, которые могут привести к преждевременному разрушению конструкций при эксплуатации. Исследования макро- и микрорельефа изломов образцов размерами 350×90×20 мм, испытанных в условиях статического трехточечного изгиба по ГОСТ 6713—2021, показали, что значения критической температуры хрупкости образцов большего поперечного сечения выше ее значений, оцененных по данным ударных испытаний. Доля вязкой составляющей в изломах образцов после ТО выше, чем у образцов после КП + УО, как при комнатной, так и при пониженной температурах.

*Ключевые слова:* сталь 10ХСНД; термическая обработка; контролируемая прокатка; ударная вязкость; вязко-хрупкий переход; критическая температура хрупкости; фрактография.

Основными материалами для мостовых конструкций служат низколегированные стали 15ХСНД и 10ХСНД с повышенным сопротивлением атмосферной коррозии [1], которые были разработаны в середине XX в. Согласно ГОСТ Р 55374—2012<sup>2</sup> ранее для изготовления толстолистового проката ответственного назначения 2- и 3-й категории для мостостроения были регламентированы две

технологии — нормализация и закалка с высоким отпуском, в результате применения которых снимаются остаточные напряжения, структура становится однородной, улучшаются механические свойства и ударная вязкость. Во введенном в 2021 г. стандарте ГОСТ 6713—2021<sup>3</sup> для изготовления листового проката была разрешена технология контролируемой прокатки (КП), в том числе с ускоренным охлаждением (УО).

За рубежом в течение последних 30 лет эта технология используется при производстве мостовых сталей, что отражено в требованиях зарубежных стандартов ASTM A709<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках договора № УС/23-1597 от 05.06.2023 «Исследование влияния термической обработки и термомеханической прокатки на структуру и механические свойства листового проката из стали марки 10ХСНД» между АО «Уральская Сталь» и ИМЕТ РАН, руководитель докт. техн. наук И.О. Банных, куратор канд. техн. наук Е.И. Лукин.

<sup>2</sup>ГОСТ Р 55374—2012. Прокат из стали конструкционной легированной для мостостроения. Общие технические условия.

<sup>3</sup>ГОСТ 6713-2021. Прокат из конструкционной стали для мостостроения. Технические условия.

<sup>4</sup>ASTM A709M-17e1. Standard Specification for Structural Steel for Bridges.

(США), EN 10025-5:2004<sup>5</sup> (Евросоюз) и JSA-JIS G 3106<sup>6</sup> (Япония). Известно, что при использовании КП сокращается число технологических операций по изготовлению листового проката и соответственно снижается себестоимость готовой продукции [2, 3]. Преимуществом этой технологии является также возможность изготовления менее материалоёмких [4] и более длинных элементов мостовых конструкций, что позволяет сократить число соединений [5]. При этом к недостаткам технологии КП можно отнести неоднородность структуры, проявляющуюся в полосчатости и образовании текстуры [2], которые могут привести к зарождению расщелиний при эксплуатации.

В исследованиях проката, изготовленного по технологии КП, выполненных за последние годы, отмечается снижение его стойкости к сероводородному растрескиванию под напряжением [6] и ударной вязкости во всем диапазоне температур испытаний [7] по сравнению с такой же сталью после режима термической обработки (ТО): закалка + отпуск.

В нашей стране технология КП успешно внедрена для производства трубных сталей, однако это потребовало разработки специальных марок сталей [8], а также исследования их прочностных свойств, трещиностойкости, свариваемости и других характеристик, обеспечивающих надёжную эксплуатацию.

Сталь 10ХСНД впервые была включена в ГОСТ 6713—75 с обязательным использованием ТО для изготовления металлоконструкций. Применение КП для стали 10ХСНД может быть затруднено вследствие узкого температурного интервала режимов КП [2, 9]. Поэтому изменение технологии изготовления проката из стали 10ХСНД без всестороннего анализа различных факторов, определяющих надёжность изготовленных из нее конструкций, вызывает ряд вопросов. Так, несмотря на то, что в работе [10] отмечается соответствие требованиям нормативной документации механических свойств проката из стали 10ХСНД, изготовленного по технологии КП, по данным [11] эту технологию еще нельзя назвать достаточно изученной

для внедрения в практику, так как есть опасность возникновения трещин в сварных соединениях мостовых конструкций из-за остаточных напряжений в стальном прокате 10ХСНД после КП. Кроме того, как показано в работе [12], нагрев этой стали в процессе сварки выше температуры 850 °С приводит к резкому снижению значений ударной вязкости ниже регламентированных стандартом.

Важной характеристикой работоспособности материала является температура вязко-хрупкого перехода и, хотя определение этой температуры не входит в требования нормативной документации, необходимость ее оценки для стали, изготовленной по новой технологии, не вызывает сомнений. Это связано с тем, что мостовые конструкции могут эксплуатироваться при температурах окружающей среды до –50 °С, и если температура вязко-хрупкого перехода, при которой сталь начинает терять свою пластичность и становится более хрупкой, будет находиться в диапазоне температур эксплуатации конструкции, то возникает опасность их неконтролируемого разрушения.

Целью настоящего исследования было изучение влияния режимов обработки стали 10ХСНД и ориентации нагрузки по отношению к направлению прокатки на ударную вязкость, динамическую трещиностойкость, температуру вязко-хрупкого перехода и механизмы разрушения образцов, испытанных в условиях ударного и статического нагружения.

**Материал и методы исследования.** Исследование влияния режимов обработки стали 10ХСНД и ориентации ее образцов по отношению к направлению прокатки на механические свойства и механизмы разрушения при ударном и статическом трехточечном изгибе выполняли после ее ТО (закалка + отпуск, температура аустенитизации в интервале 910—960 °С, температура отпуска в интервале 600—680 °С) и после КП + УО (температура конца прокатки в интервале 800—900 °С). Выплавка, горячая прокатка и ТО проката в промышленных условиях проведены на предприятии АО «Уральская Сталь».

Химический состав, оцененный с использованием комплекса атомно-эмиссионного спектрального анализа с анализатором МАЭС (модель Гранд-Эксперт), и механичес-

<sup>5</sup>EN 10025-5:2004. Hot rolled products of structural steels. Part 5: Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance.

<sup>6</sup>JSA-JIS G 3106. Rolled steels for welded structure.

Химический состав, %, исследуемой стали 10ХСНД  
(Fe — остальное)

Обработка	C	Cr	Si	Mn	Ni	Cu	Al	S	P	As
ТО	0,0981	0,568	1,03	0,509	0,549	0,413	0,044	0,0020	0,0079	0,0017
КП + УО	0,107	0,579	1,14	0,499	0,552	0,418	0,041	0,0043	0,0076	0,0022

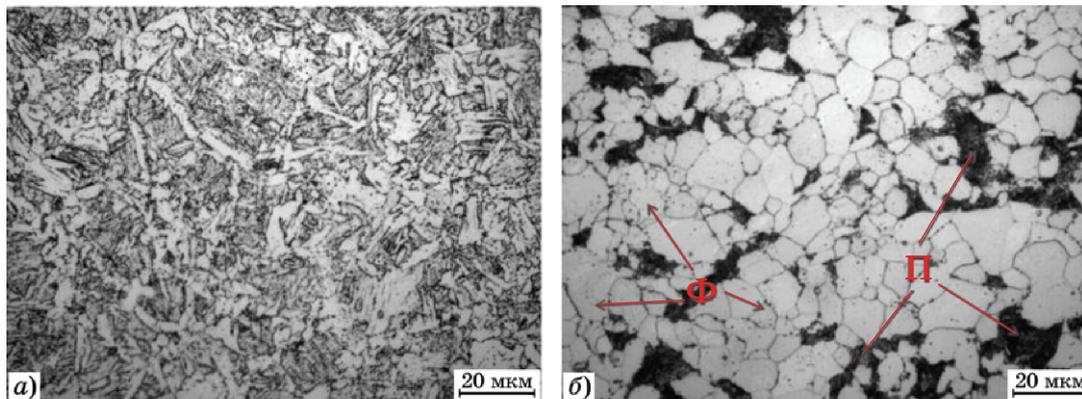
Таблица 2

Механические свойства исследуемой стали [13]

Обработка	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta, \%$	$KCV_{-20}, Дж/см^2$
	МПа			
ТО	415	580	27	294—311
КП + УО	410	560	24,5	118—103

кие свойства представлены соответственно в табл. 1 и 2 [13].

Структура исследуемой стали в состоянии после ТО состоит из зернистого перлита и отпущенного мартенсита (фиг. 1, а), а после КП + УО — из феррита и перлита с сильной разноструктурностью и строчечными включениями (фиг. 1, б) [13].



Фиг. 1. Микроструктура исследуемой стали в состояниях после ТО (а) и КП + УО (б) [13]

Исследование включало испытания стандартных образцов на ударный изгиб и образцов толщиной 20 мм на статический трехточечный изгиб. Испытания на ударный изгиб стандартных образцов размерами 55×10×10 мм с V-образным надрезом по ГОСТ 9454—78<sup>7</sup> проводили на маятниковом копре Zwick/Roell RKP 450 в интервале температур от –80 до +20 °С с записью диаграммы деформирования и последующей оценкой ударной вязкости  $KCV$ , полной работы раз-

рушения  $A$ , работы зарождения  $A_3$ , а также работы распространения трещины  $A_p$ , оцененной по соотношению  $A_p = A - A_3$ .

Кроме того, по работе зарождения трещины оценивали значения динамической трещиностойкости  $J_{id}$  [14]:

$$J_{id} = 2A_3/H(W - a), \quad (1)$$

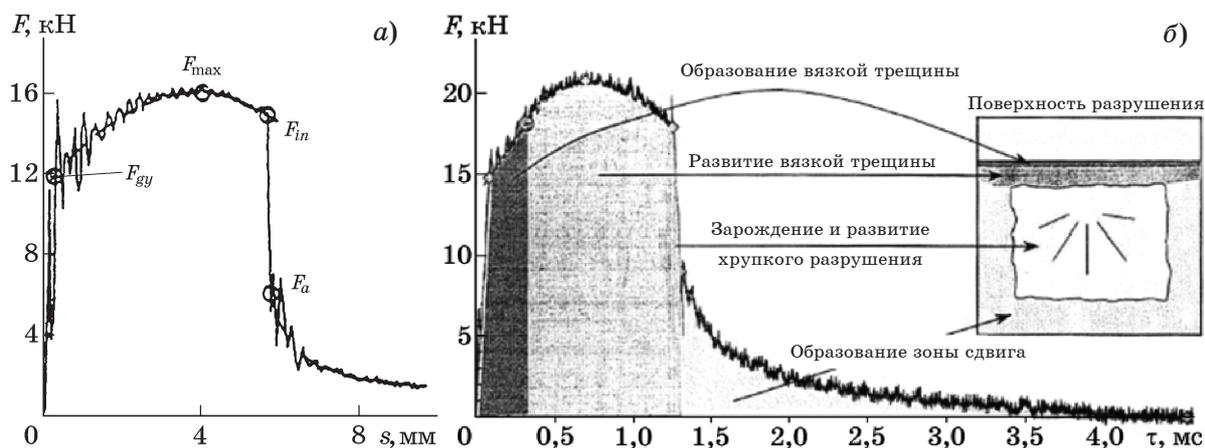
где  $W$ ,  $H$  — соответственно ширина и высота образца;  $a$  — длина предварительно нанесенной усталостной трещины (принята равной длине надреза образца). Всего испытано 69 образцов, не менее трех образцов на каждую температуру.

Использование копров с записью диаграммы деформирования позволяет выделить пороговые нагрузки (фиг. 2, а), связанные с из-

менением стадий и механизмов развития трещины за время  $\tau$  (фиг. 2, б). Согласно стандарту ISO 14556<sup>8</sup> и литературным данным [15, 16] по диаграмме ударного деформирования (фиг. 2, а) могут быть оценены нагрузки, соответствующие началу общей текучести ( $F_{gy}$ ), достижению максимума на кривой при нагрузке  $F_{max}$ , началу нестабильного хрупкого разрушения ( $F_{iu}$ ) и затупления трещины ( $F_a$ ). Выделенные на фиг. 2, б нагрузки отражают стадии разрушения

<sup>7</sup>ГОСТ 9454—78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

<sup>8</sup>ISO 14556. Metallic materials. Charpy V-notch pendulum impact test. Instrumented test method.



Фиг. 2. Диаграмма деформирования образца на ударный изгиб с выделенными нагрузками по ISO 14556 [15] (а) и взаимосвязь энергии динамического разрушения с макрорельефом излома образца [16] (б)

ударных образцов [16]. Приведенный на фиг. 2, а тип диаграммы соответствует вязко-хрупкому разрушению образцов, в этом случае согласно стандарту EN DIN 14556 определение выделенных нагрузок и стадий разрушения будет корректным.

Испытания на статический трехточечный изгиб по ГОСТ 6713—2021<sup>9</sup> выполняли на 14 образцах размером 350×90×20 мм при двух температурах (+20 и -60 °С), которые выше и ниже порога хладноломкости, определенного по результатам ударных испытаний. Температуру охлаждения образцов фиксировали перед испытанием и в процессе нагружения ее не контролировали.

После испытаний на ударный и статический изгиб выполняли фрактографический анализ макро- и микрорельефа изломов образцов с применением оптического (ЛМО МСП-2) и сканирующего электронного (Jeol JXA-iSP 100) микроскопов.

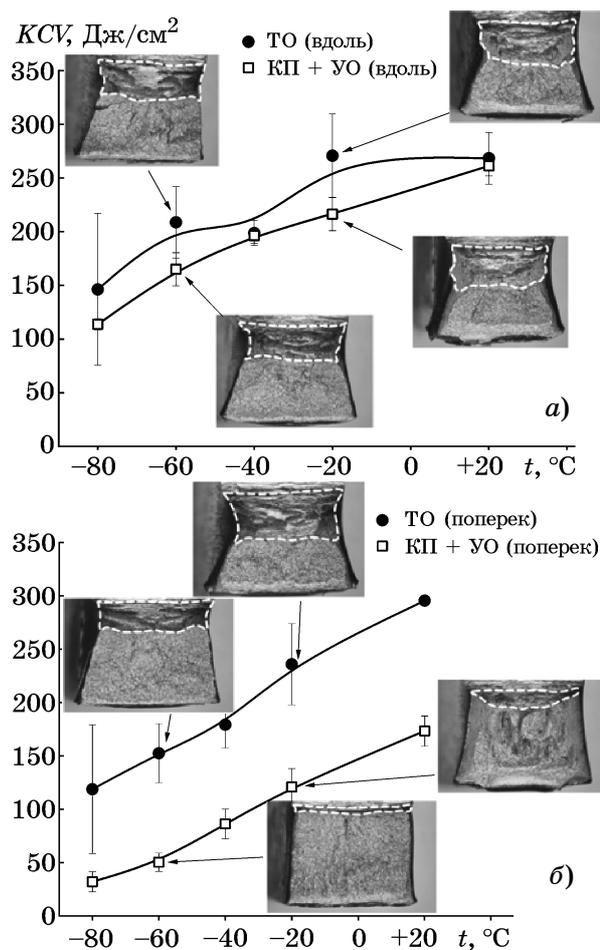
По результатам анализа макрорельефа изломов образцов оценивали критическую температуру хрупкости по 50%-ной доле вязкой составляющей в изломе ( $B$ , %) согласно ГОСТ 6713—2021, ГОСТ 30456—2021<sup>10</sup>, ГОСТ Р 52927—2023<sup>11</sup>, а также по ширине зоны стабильного роста трещины ( $l_c$ ) согласно методическим рекомендациям МР 5-81 [17].

<sup>9</sup>ГОСТ 6713—2021. Межгосударственный стандарт. Прокат из конструкционной стали для мостостроения. Технические условия.

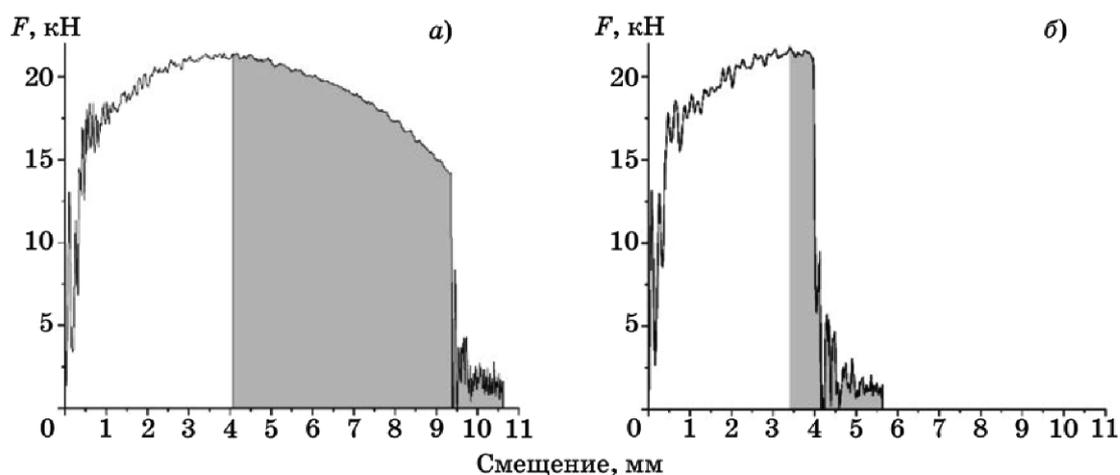
<sup>10</sup>ГОСТ 30456—2021 «Металлопродукция. Трубы стальные, прокат стальной листовой и рулонный. Метод испытания на ударный изгиб падающим грузом»

<sup>11</sup>ГОСТ Р 52927—2023. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия.

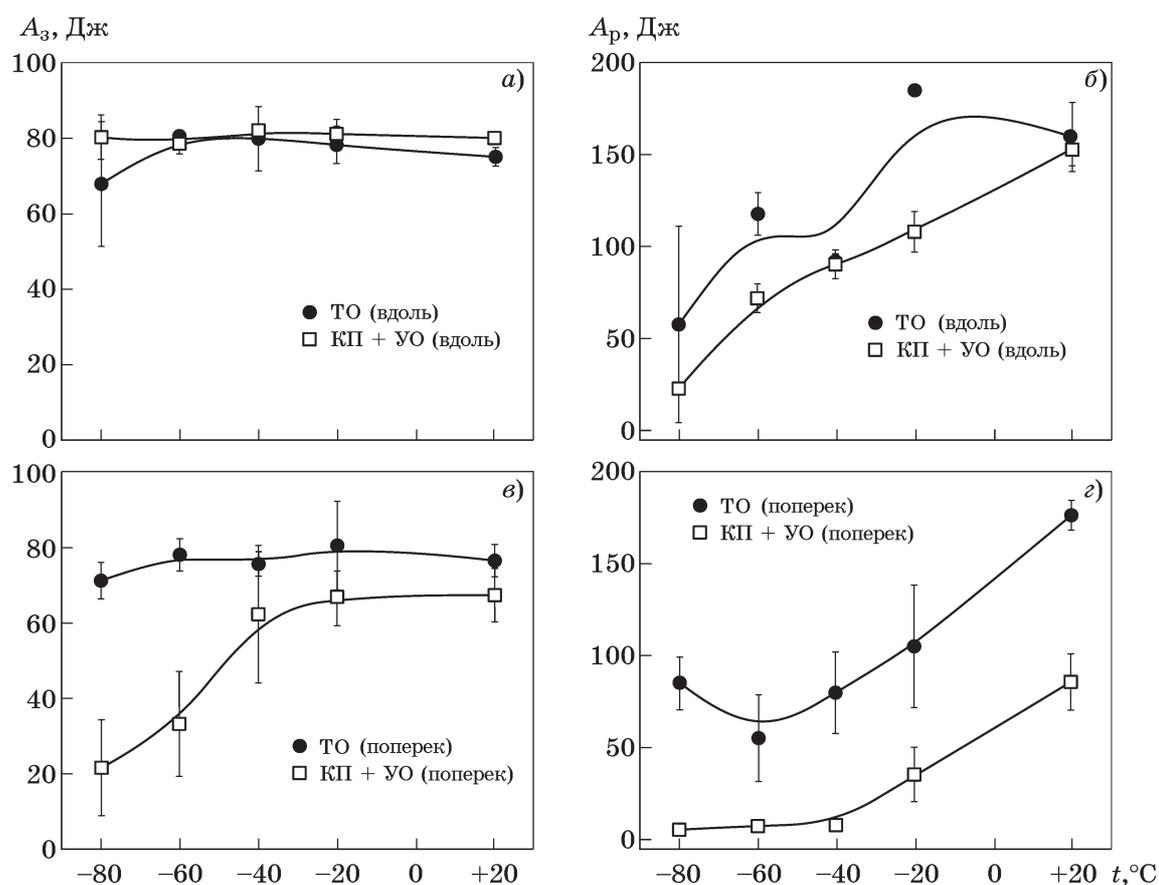
**Результаты исследования и их обсуждение. Инструментальные испытания на ударный изгиб.** На фиг. 3, а, б приведены температурные зависимости ударной вязкости KCV и макрорельефа изломов образцов, вырезанных в продольном и поперечном направ-



Фиг. 3. Температурные зависимости ударной вязкости продольных (а) и поперечных (б) образцов исследуемой стали и макрорельеф изломов в интервале вязко-хрупкого перехода



Фиг. 4. Диаграммы ударного разрушения поперечных образцов после ТО (а) и после КП + УО (б) при  $t = -40^\circ\text{C}$  с выделенной областью, характеризующей работу распространения трещины



Фиг. 5. Температурные зависимости работ зарождения (а, в) и распространения (б, г) трещины, оцененные при испытании продольных (а, б) и поперечных (в, г) образцов из стали после обработки по технологиям ТО и КП + УО

лениях по отношению к направлению прокатки. Видно, что ударная вязкость образцов в обоих направлениях после ТО выше по сравнению с ударной вязкостью образцов после КП + УО, особенно для поперечных образцов (фиг. 3, б). Наблюдается изменение и макрорельефа образцов в области вязко-хрупкого перехода в зависимости от технологии изготовления и

направления вырезки образца: зона стабильного роста трещины ( $l_c$ ) под надрезом, выделенная штриховой линией, снижается с понижением температуры, особенно для образцов после КП + УО. Детальный анализ макрорельефа изломов будет представлен далее.

Более низкая энергоёмкость поперечных образцов после КП + УО демонстрируется на

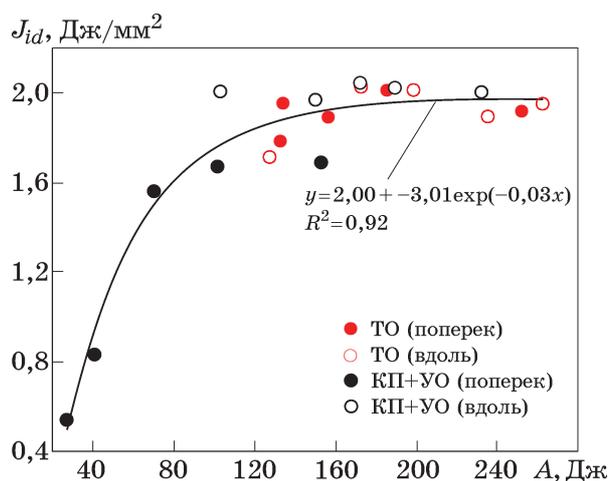
фиг. 4. Представленные диаграммы получены при ударном разрушении поперечных образцов, испытанных при температуре  $t = -40$  °С. Видно, что площадь диаграммы ударного разрушения образца после КП + УО (фиг. 4, б) значительно меньше по сравнению с образцом после ТО (фиг. 4, а).

По площади диаграмм до и после максимальной нагрузки были оценены работы зарождения ( $A_z$ ) и распространения ( $A_p$ ) трещины, температурные зависимости которых на фиг. 5 свидетельствуют о пониженных значениях работы распространения трещины после КП + УО во всем интервале температур испытаний. Работа зарождения трещины также ниже, кроме продольных образцов, при разрушении которых ее значения для обеих технологий близки.

Пониженные значения работы распространения трещины при испытании поперечных образцов свидетельствуют о пониженной трещиностойкости стали в состоянии как после ТО, так и после КП + УО, вызывающей ее наибольшее снижение. Эти данные показывают, что обе технологии приводят к появлению анизотропии свойств, более выраженной после КП + УО.

Результаты оценки динамической трещиностойкости  $J_{id}$  по соотношению (1) [14] и построение зависимости  $J_{id}$  от полной работы разрушения  $A$  (фиг. 6) показывают, что поперечные образцы после обработки КП + УО демонстрируют наименьшие значения динамической трещиностойкости во всем интервале температур испытаний при равных значениях полной работы разрушения. Полученная зависимость описывается экспоненциальным соотношением, приведенным на фиг. 6, которое может быть полезным при выборе оптимальной структуры материала. Оцененные характеристики контролируются механизмами разрушения, особенности которых следует рассмотреть.

**Анализ изломов образцов, испытанных на ударный изгиб. Макрорельеф изломов.** Анализ макрорельефа разрушения выполняли в согласии с методикой МР 5-81 [17] и рекомендациями из работы [18], предполагающими оценку в интервале вязко-хрупкого перехода размеров зоны вязкого стабильного роста трещины ( $l_c$ ) (включающей зону начального сдвига ( $\theta$ )), а также ширины губ среза ( $\lambda/2$ ) и доли вязкого разрушения ( $B$ , %), в которую входят площади зоны стабильного



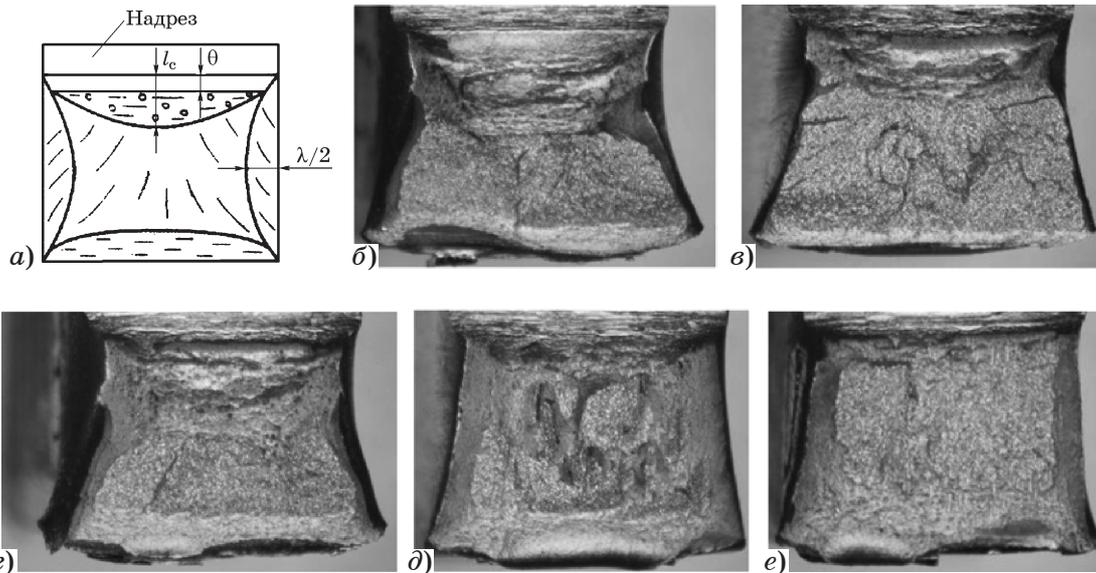
Фиг. 6. Взаимосвязь динамической трещиностойкости и полной работы разрушения в зависимости от технологии изготовления стали и направления вырезки образца

роста трещины, губ среза и периферийной области в конце излома.

Остальная, центральная, площадь образца, соответствующая области хрупкого разрушения (фиг. 7, а), оценивалась с помощью компьютерной обработки изображений макрорельефа изломов. Далее из общей площади излома вычитали значения площади хрупкой области и получали площадь излома с вязкой составляющей, относительную долю которой ( $B$ , %) определяли по отношению площади вязкой составляющей к общей площади излома.

На фиг. 3 и 7 представлены макрорельефы образцов исследуемой стали с выделенными на фиг. 3 штриховыми линиями зонами стабильного роста трещины  $l_c$  в устье надреза (см. фиг. 7, а).

Показаны макроизломы продольных (фиг. 7, б) и поперечных (фиг. 7, в) образцов на ударный изгиб стали после ТО при температуре  $-60$  °С, близкой к критической температуре хрупкости продольных образцов обоих состояний, а также продольных (г) и поперечных (д, е) образцов стали после КП + УО при температуре испытаний  $-20$  °С, близкой к температуре хрупкости поперечных образцов. Макрорельеф и ширина зон отражают характер разрушения в области вязко-хрупкого перехода стали в зависимости от технологии изготовления и направления вырезки образца. Видно, что с понижением температуры испытаний доля волокнистой составляющей в изломе снижается, появляются локализованные зоны хрупкого разрушения.



Фиг. 7. Схема смешанного излома ударных образцов из мало- и среднеуглеродистых сталей в интервале вязко-хрупкого разрушения (а) [18], макрорельеф продольного (б) и поперечного (в) изломов образцов стали после ТО при температуре испытаний  $t = -60^\circ\text{C}$  и продольного (г) и поперечного (д, е) изломов образцов стали после КП + УО при температуре испытаний  $t = -20^\circ\text{C}$

Протяженность зон хрупкого разрушения увеличивается как после КП + УО, так и при изменении ориентации образцов с продольной на поперечную, что приводит к повышению критической температуры хрупкости (КТХ), оцененной по 50%-ной доле вязкой составляющей в изломе (табл. 3, фиг. 8). При изменении технологии обработки с ТО на КП + УО значения КТХ повысились на 18% для продольных образцов и на 55% для поперечных, а при изменении ориентации образцов с продольной на поперечную КТХ по-

высилась на 41% в случае обработки по технологии ТО и на 67% при обработке по технологии КП + УО.

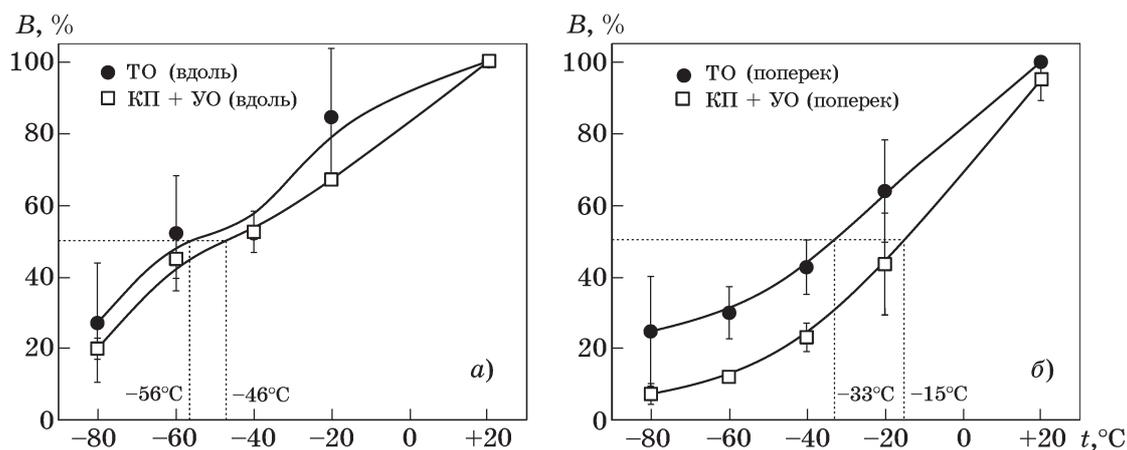
Исследование макроизломов ударных образцов показало информативность зоны стабильного роста трещины  $l_c$ , размер которой на изломах образцов на ударный изгиб после ТО больше ее размеров после КП + УО. При этом при комнатной температуре зона вязкого разрушения распространяется почти на все поперечное сечение образцов из сталей, обработанных по обеим технологиям

Таблица 3

Результаты количественного анализа параметров изломов образцов на ударный изгиб после ТО и после КП + УО

Обработка	$t, ^\circ\text{C}$	Направление вырезки	$l_c$	$h^*$	$l_c/h, \%$	$B, \%$
			мм			
ТО	+20	Продольное	$6,6 \pm 0,5$	$7,3 \pm 0,3$	$91,0 \pm 3,7$	$100 \pm 0$
		Поперечное	$6,7 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,2$	$90,4 \pm 3,3$	$100 \pm 0$
	-60	Продольное	$3,6 \pm 0,6$	$7,8 \pm 0,2$	$46,0 \pm 8,6$	$52 \pm 16$
		Поперечное	$2,2 \pm 0,7$	$7,8 \pm 0,2$	$28,6 \pm 9,0$	$30 \pm 7$
КП + УО	+20	Продольное	$6,7 \pm 0,3$	$7,4 \pm 0,2$	$89,5 \pm 4,5$	$100 \pm 0$
		Поперечное	$6,6 \pm 0,1$	$7,9 \pm 0,1$	$83,2 \pm 2,7$	$95 \pm 6$
	-60	Продольное	$2,7 \pm 0,4$	$7,6 \pm 0,2$	$36,0 \pm 5,7$	$45 \pm 6$
		Поперечное	$0,2 \pm 0,1$	$7,9 \pm 0,1$	$3,0 \pm 1,1$	$12 \pm 1$

\* $h$  — длина излома.



Фиг. 8. Температурные зависимости доли  $B$  вязкой составляющей изломов и отмеченные значения КТХ для продольных (а) и поперечных (б) образцов исследуемой стали

(см. табл. 3), а при более низких температурах за зоной вязкого разрушения ( $l_c$ ) следует область хрупкого разрушения.

Оцененные значения КТХ (по  $B$  и  $l_c$ ) согласно указанной методике МР 5-81 практически совпадают (табл. 4). Это не только подтверждает факт повышения значения КТХ исследуемой стали при изменении технологии обработки и смене ориентации образцов, но и позволяет использовать параметры изломов (в частности  $l_c$ ) для оценки КТХ. Для исследуемой стали значению КТХ соответствует длина стабильного роста трещины  $l_c = 2\text{--}3$  мм (для более точной ее оценки требуется дополнительное исследование).

**Микрорельеф изломов.** Стадийность развития трещины и механизмы разрушения

Таблица 4

Значения КТХ, оцененные по доле  $B$  вязкой составляющей в изломе (в числителе) и по зоне стабильного роста трещины  $l_c$  (в знаменателе)

Обработка	Направление вырезки	КТХ, °C ( $B/l_c$ )
ТО	Продольное	-56/-55
	Поперечное	-33/-36
КП + УО	Продольное	-46/-50
	Поперечное	-15/-19

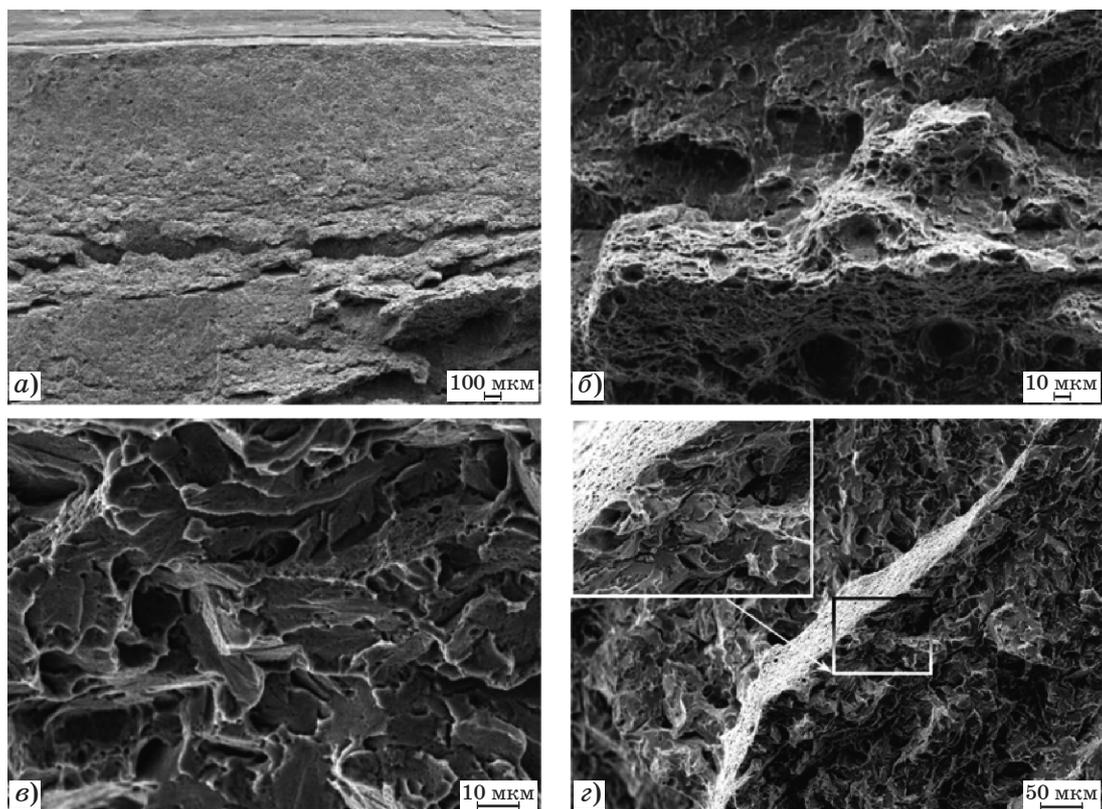
образцов исследуемой стали на ударный изгиб более детально были изучены при исследовании микрорельефа их изломов, полученных при испытаниях в диапазоне температур вязко-хрупкого перехода (фиг. 9—12). Исследовали микрорельеф изломов продольных и поперечных образцов после ТО

при температуре  $-60$  °C, близкой к критической температуре для продольных образцов, и после КП + УО при температуре испытания  $-20$  °C, близкой к критической температуре для поперечных образцов.

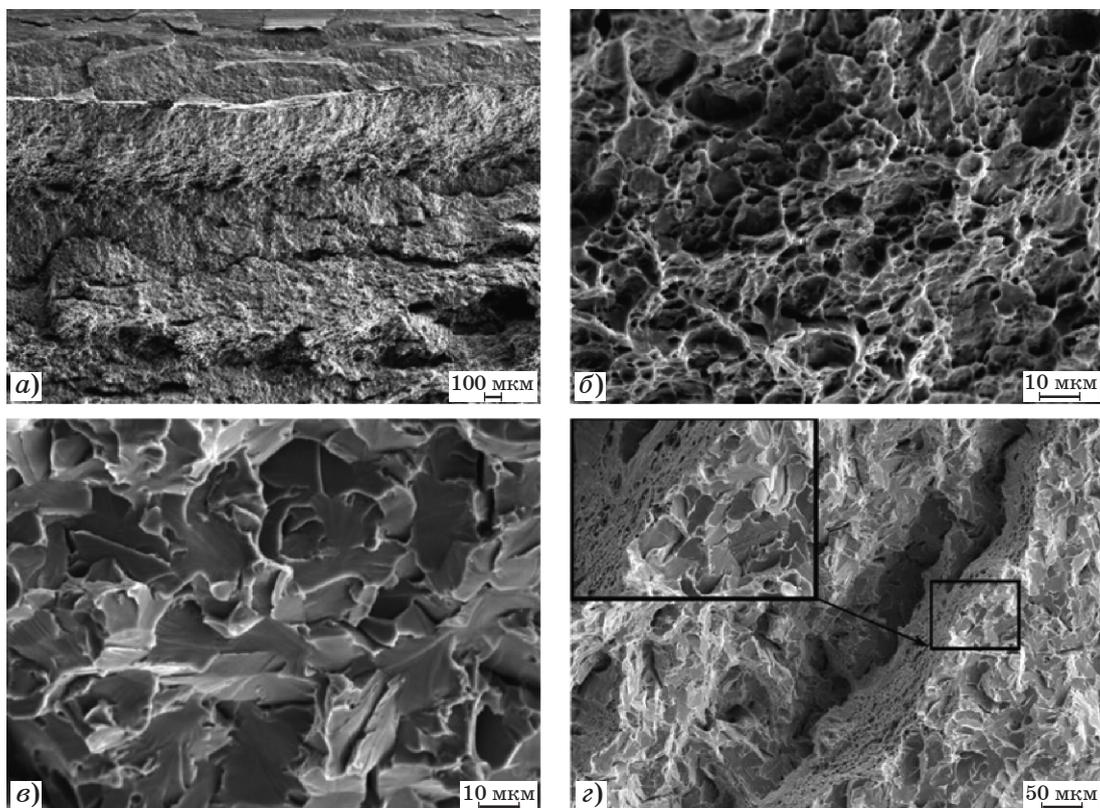
На начальной стадии разрушения в области надреза для всех образцов характерно формирование микрорельефа со сдвиговыми гребнями и полосами вязкого разрушения, параллельными надрезу (фиг. 9—12, а), затем следует вязкая область с преимущественно ямочным микрорельефом, состоящим из равноосных и вытянутых ямок (фиг. 9—12, б). Обе области со сдвиговым и ямочным микрорельефами входят в зону стабильного роста трещины  $l_c$  (см. фиг. 7). В центральной части образцов в области вязко-хрупкого перехода преобладают фасетки скола (фиг. 9—12, в) с расслоениями (фиг. 9—12, г), плотность и протяженность которых заметно выше после КП + УО. На боковых поверхностях расслоений наблюдается как хрупкий (фасетки скола), так и вязкий рельеф, показывающий, что и в плоскости расслоений разрушение носит смешанный характер (см. фиг. 11, 12, з).

Губы среза и периферийная область долома характеризуются вязким ямочным рельефом сдвигового или отрывного типа.

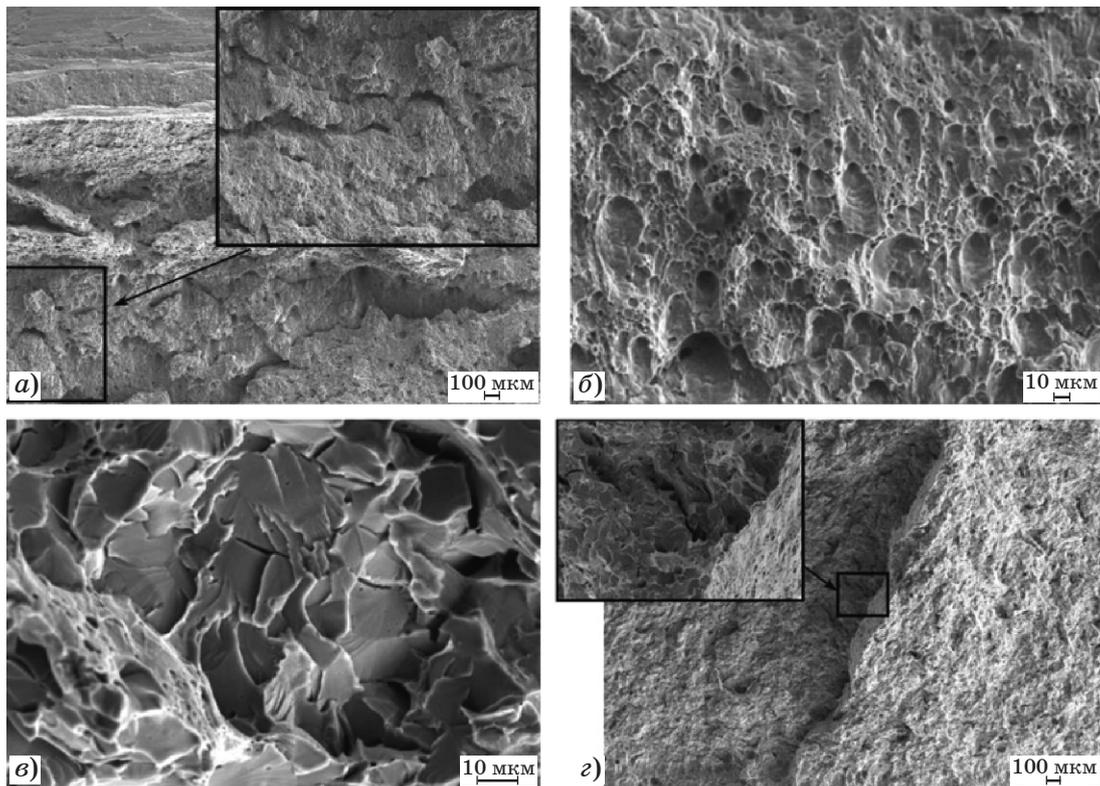
Таким образом, микрорельеф исследуемых образцов, испытанных на ударный изгиб, двух обработок, вырезанных вдоль и поперек прокатки, в основном остается подобным, но меняется ширина зоны стабильного роста трещины, определяющей значение КТХ (см. фиг. 3, 7, табл. 4). При переходе от технологии производства с ТО на КП + УО и смене ориентации образцов с продольной на



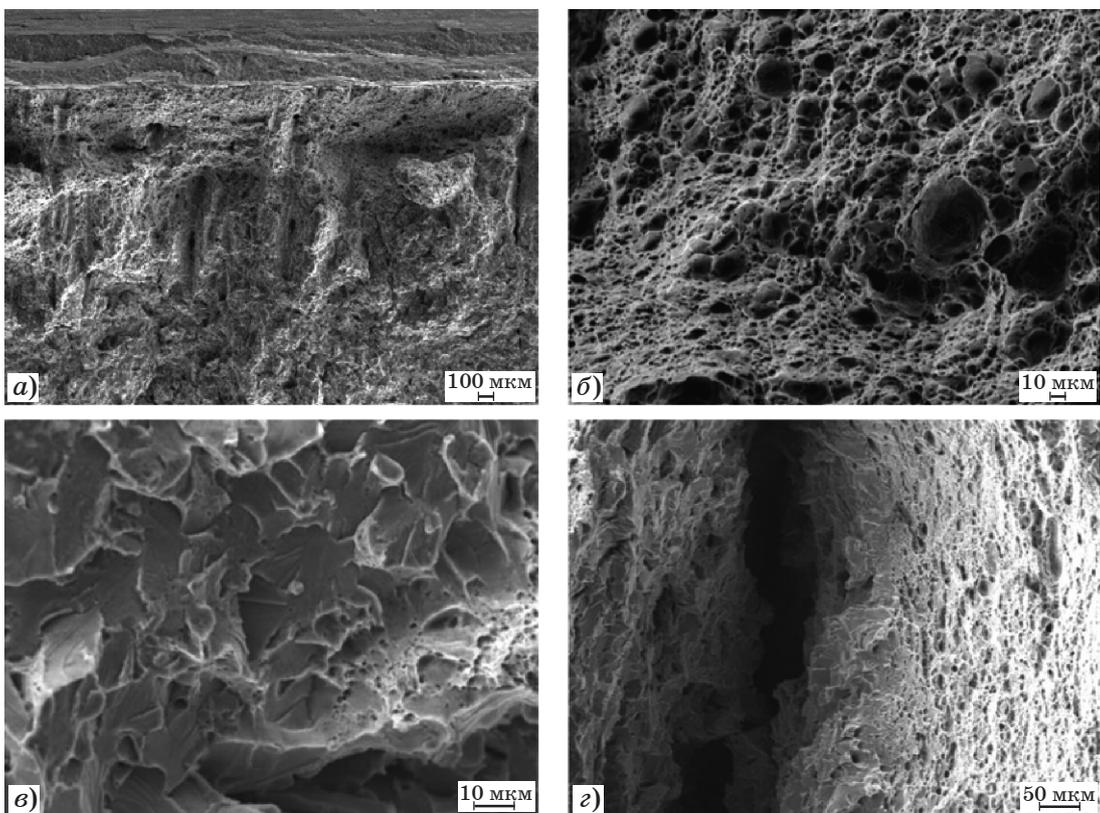
Фиг. 9. Микрорельеф поверхности разрушения продольных образцов на ударный изгиб после ТО при температуре испытаний  $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в области: сдвигового разрушения (а); перехода от сдвигового разрушению к отрыву в зоне стабильного роста трещины (б); центральной зоны хрупкого разрушения с вязкими гребнями (в, д)



Фиг. 10. Микрорельеф поверхности разрушения поперечных образцов на ударный изгиб после ТО при температуре испытаний  $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в области: начального сдвигового разрушения (а); зоны стабильного роста трещины (б); центральной зоны хрупкого разрушения (в); микротрещин расслоения в зоне хрупкого разрушения (д)



Фиг. 11. Микрорельеф поверхности разрушения продольных образцов на ударный изгиб после КП + УО при температуре испытаний  $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в области: начального сдвигового разрушения с зоной стабильного роста трещины (а, б); центральной зоны хрупкого разрушения (в) с микротрещинами расслоениями (г)



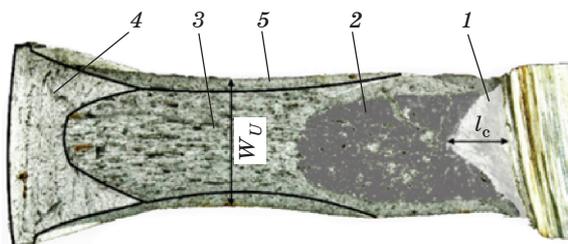
Фиг. 12. Микрорельеф поверхности разрушения поперечных образцов на ударный изгиб после КП + УО при температуре испытаний  $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в области: начального сдвигового разрушения с зоной стабильного роста трещины (а, б); центральной зоны хрупкого разрушения (в) с микротрещинами расслоениями (г)

поперечную зона стабильного роста трещины уменьшается. Кроме этого, растет плотность расслоений, которые могут привести к преждевременному разрушению конструкций в процессе эксплуатации в сложных условиях [19], в частности, в коррозионной среде, при смешанном режиме нагружения или при приложении нагрузки в направлении толщины проката (Z-направление), что характерно для работы мостовых конструкций.

**Анализ изломов образцов, испытанных на статический трехточечный изгиб. Макрорельеф изломов.** Поскольку изделия из исследуемой стали могут быть значительно большей толщины по сравнению с образцами на ударный изгиб, были исследованы поверхности разрушения образцов с надрезом большего поперечного сечения после испытаний на статический трехточечный изгиб с учетом требований ГОСТ 6713—2021, ГОСТ 30456—2021, ГОСТ Р 52927—2023 и методических рекомендаций МР 5-81.

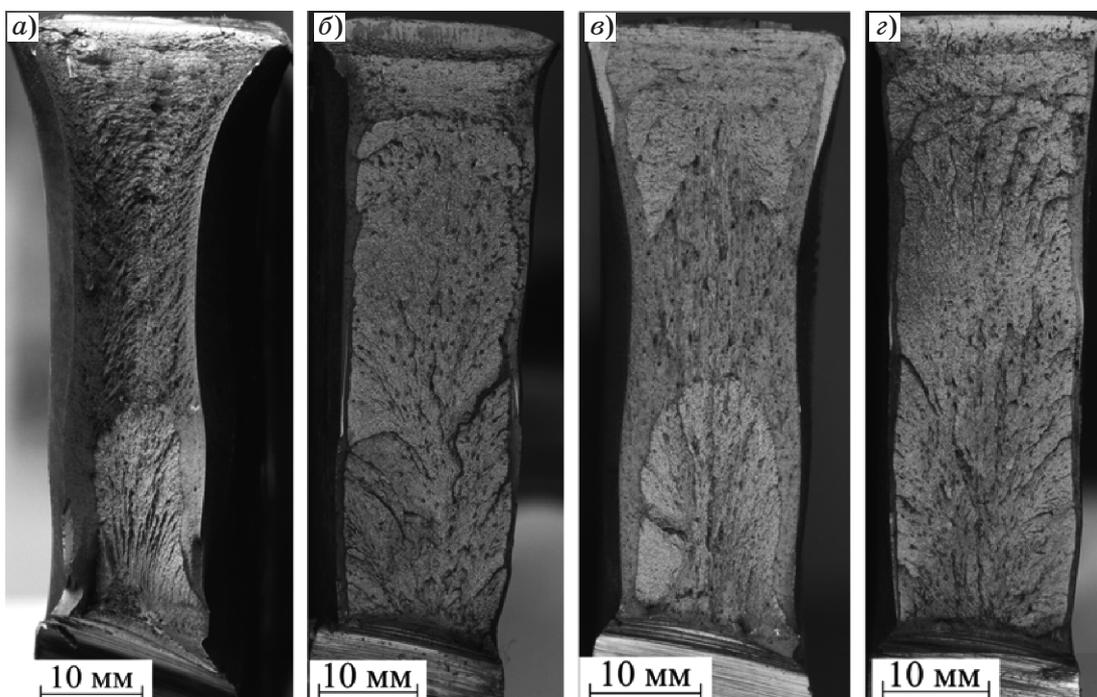
На фиг. 13 представлена схема макроизлома образца с выделенными зонами, а на фиг. 14, 15 — макрорельеф образцов соответственно после ТО и КП + УО.

Как следует из схемы и представленных фрактограмм, макрорельеф изломов образцов большего поперечного сечения при температуре испытания 20 °С отличается от макро-

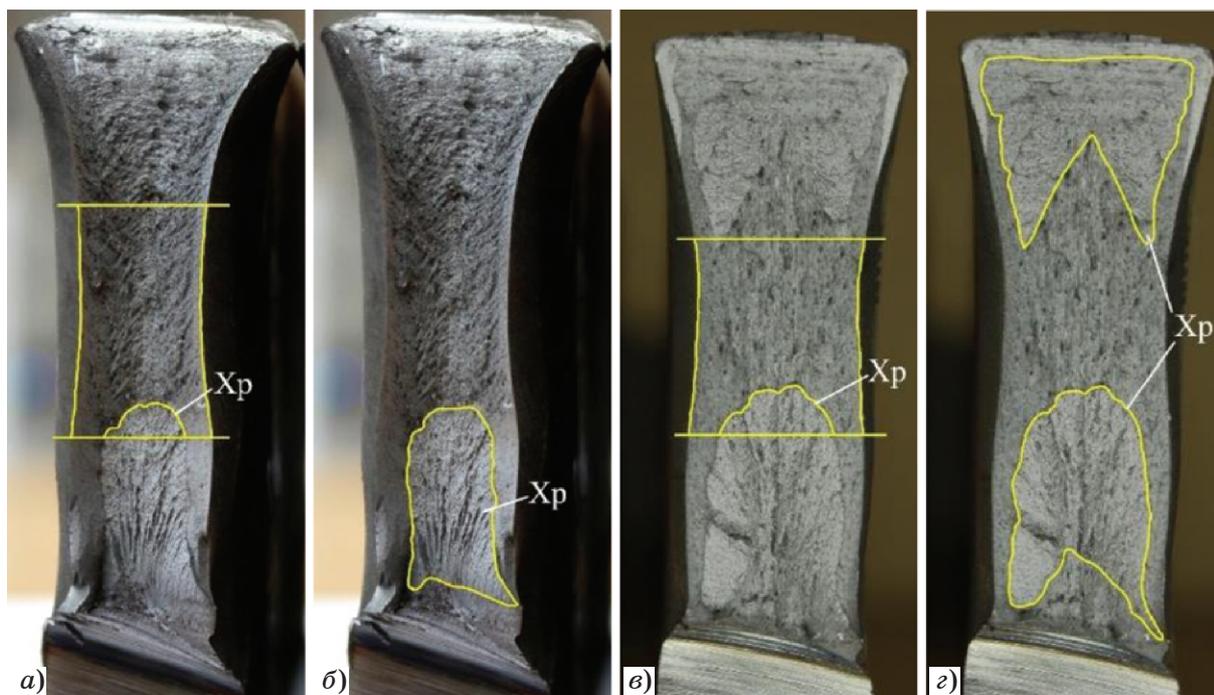


Фиг. 13. Схема макроизлома образца с выделенными областями: 1 — зона вязкого стабильного роста трещины  $l_c$ ; 2, 3 — зона ускоренного роста трещины со смешанным механизмом разрушения (2 — хрупкая область; 3 — вязкая область); 4 — зона долома; 5 — губы среза;  $W_U$  — ширина зоны утяжки образца в процессе деформирования

рельефа образцов, испытанных на ударный изгиб, и содержит несколько зон, свидетельствующих о скачкообразном развитии трещины, связанном с чередованием участков хрупкого (Хр) и вязкого разрушения. При  $t = -60$  °С изломы более однородны. После ТО (см. фиг. 14, а) они имеют меньшую ширину зоны утяжки и большую ширину губ среза по сравнению с макроизломами образцов после КП + УО (фиг. 14, в), что свидетельствует о большей вязкости первых. Несколько меньшая (на ~1 мм) ширина зоны утяжки наблюдается и у образца после ТО, испытанного при  $-60$  °С (фиг. 14, б), по сравнению с образцом после КП + УО (фиг. 14, г),



Фиг. 14. Макрорельеф поверхности разрушения образцов после ТО (а, б) и после КП + УО (в, г), испытанных на трехточечный изгиб при температуре +20 °С (а, в) и  $-60$  °С (б, г)



Фиг. 15. Схемы измерения доли вязкой составляющей на фотографиях макрорельефа изломов образцов после ТО (а, б) и после КП + УО (в, г), испытанных на статический трехточечный изгиб при температуре  $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$

что также свидетельствует о более вязком характере разрушения образцов после ТО.

*Оценка температуры хрупкости по параметрам изломов.* Анализ результатов измерения зон на изломах, представленных в табл. 5, показывает, что при испытании образцов большей толщины на статический изгиб при комнатной температуре относительные размеры зоны вязкого стабильного роста трещины  $l_c/h$  мало различаются для обеих технологий обработки и составляют  $l_c/h = 12,7 \pm 2,0\%$  для ТО и  $11,4 \pm 1,2\%$  для КП + УО.

При пониженной температуре испытаний ( $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) реализуются более жесткие условия по напряженному состоянию, в резуль-

тате чего отношение  $l_c/h$  снижается на 22% для продольных образцов при переходе от технологии ТО к КП + УО, а при испытании на трехточечный изгиб образцов большей толщины параметр  $l_c/h$  снижается на 44% (см. табл. 3, 4), т.е. зона стабильного роста при данной температуре испытания уменьшается, а значит КТХ повышается.

Из анализа результатов оценки доли вязкой составляющей в изломе образцов толщиной 20 мм согласно стандартам ГОСТ 30456—2021 и ГОСТ Р 52927—2023, приведенных в табл. 5, можно заключить следующее. В первом случае при оценке  $B, \%$  от края образца и от вершины надреза отступали на расстояние 19 мм (см. отмеченные

Таблица 5

Результаты количественного анализа параметров изломов образцов после ТО и после КП + УО, испытанных на трехточечный изгиб

Обработка	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$l_c$	$h$	$l_c/h, \%$	$B, \%$	
		мм			ГОСТ 30456—21	ГОСТ Р 52927—2023
ТО	+20	$7,3 \pm 1,3$	$57,6 \pm 2,8$	$12,7 \pm 2,0$	$90 \pm 6$	$76 \pm 9$
	-60	2,8	62	4,5	1	21
КП + УО	+20	$6,4 \pm 0,9$	$55,9 \pm 0,7$	$11,4 \pm 1,2$	$88 \pm 3$	$52 \pm 9$
	-60	1,5	61	2,5	0	10

линии на фиг. 15, *а, в*) и в этой области (в средней части образца) определяли площадь хрупкой зоны (или зон). Во втором случае площадь зон хрупкого разрушения (зоны Хр отмечены на фиг. 15) оценивали на всей поверхности образца. Долю вязкой составляющей  $B, \%$ , в обоих случаях определяли по разности общей площади излома и площади хрупких зон.

Для сравнения полученных значений были выбраны только разрушившиеся по схожему механизму образцы, излом которых содержал хрупкую зону. Было обнаружено, что доля вязкой составляющей, определенная по стандарту ГОСТ Р 52927—2023 при температуре  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  по всей площади излома образцов после ТО, составляет  $B = 76 \pm 9\%$ , а для образцов после КП + УО  $B = 52 \pm 9\%$ , т.е. в последнем случае наблюдается снижение доли вязкой составляющей  $B$  на 24% в сравнении с образцами, полученными по технологии ТО.

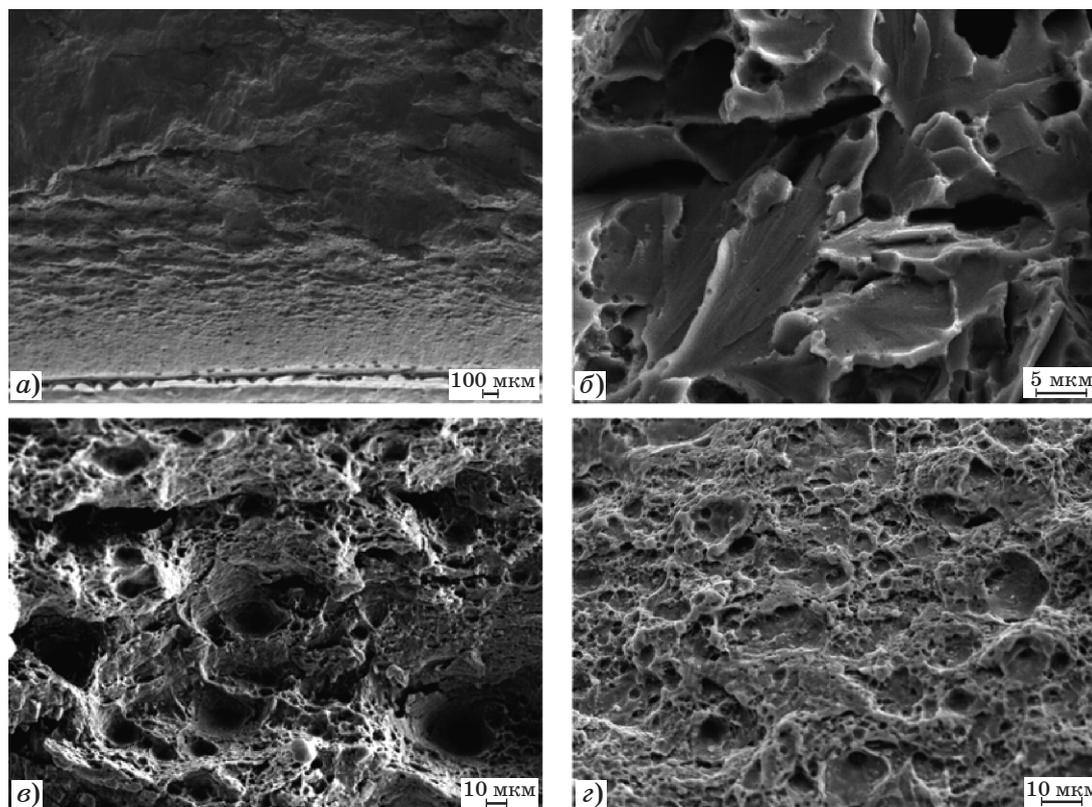
При определении площади вязкой составляющей по ГОСТ 30456—2021 разница не существенна:  $B = 90 \pm 6$  и  $88 \pm 3\%$  соответственно для образцов после ТО и КП + УО.

После испытаний при пониженной температуре при  $t = -60\text{ }^\circ\text{C}$  доля вязкой составляющей, определенная по всей площади излома образцов после ТО (по ГОСТ Р 52927—2023), более чем в два раза выше, чем у образцов после КП + УО. Эти результаты согласуются с данными, полученными при ударных испытаниях (см. табл. 3).

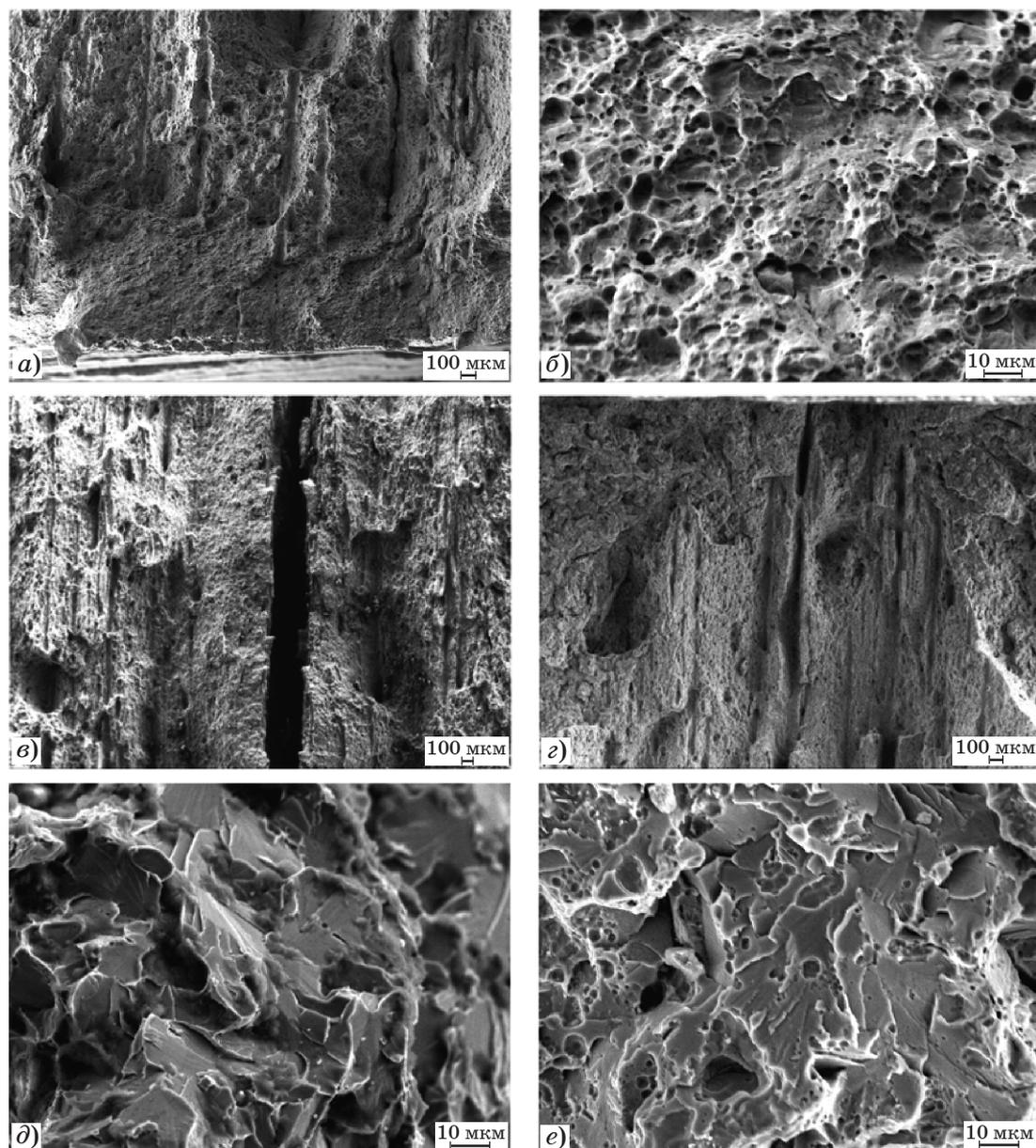
*Микрорельеф изломов.* На фиг. 16—19 представлен микрорельеф изломов образцов, испытанных на статический трехточечный изгиб, в выделенных зонах разрушения.

Микрорельеф разрушения образцов после ТО, испытанных при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , меняется от сдвигового рельефа на фиг. 16, *а* с участками волокнистого (вязкого) разрушения в зоне зарождения и стабильного роста трещины ( $l_c$ ) на хрупкий рельеф с фасетками скола в зоне хрупкого скачка трещины (фиг. 16, *б*), а затем на вязкий ямочный рельеф в зоне замедления трещины в середине образца (фиг. 16, *в*) и в зоне долома (фиг. 16, *г*).

После КП + УО эти закономерности изменения микрорельефа изломов образцов в выделенных зонах в основном сохраняются



Фиг. 16. Микрорельеф поверхности разрушения образца после ТО, испытанного на статический трехточечный изгиб при температуре  $t = +20\text{ }^\circ\text{C}$  в зоне: стабильного роста трещины у вершины надреза (*а*); хрупкого разрушения (*б*); замедления роста трещины (*в*); долома (*г*)



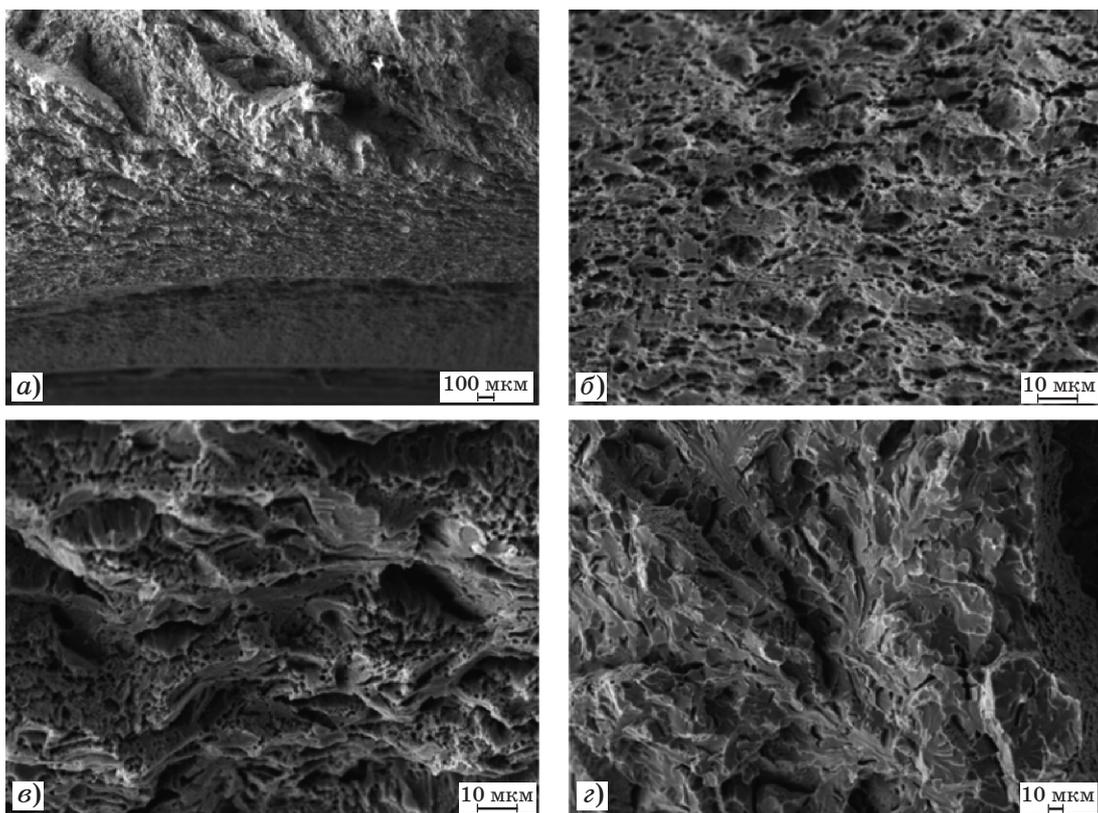
Фиг. 17. Микрорельеф поверхности разрушения образца после КП + УО, испытанного на статический трехточечный изгиб при температуре  $t = +20$  °С в зоне: стабильного роста трещины (а, б) с участком сдвигового разрушения у вершины надреза (а); замедления роста трещины (в, г) с расслоением и следами текстуры; хрупкого разрушения (д); долома (е)

и остаются подобными (фиг. 17). Однако наблюдаются и существенные отличия. В вязких областях стабильного (фиг. 17, а) и замедленного (фиг. 17, в, г) разрушения наблюдаются полосы, связанные с наличием текстуры прокатки листов, из которых были вырезаны образцы. При разрушении образцов вдоль линий текстуры образуются трещины расслоения (фиг. 17, а, в, г).

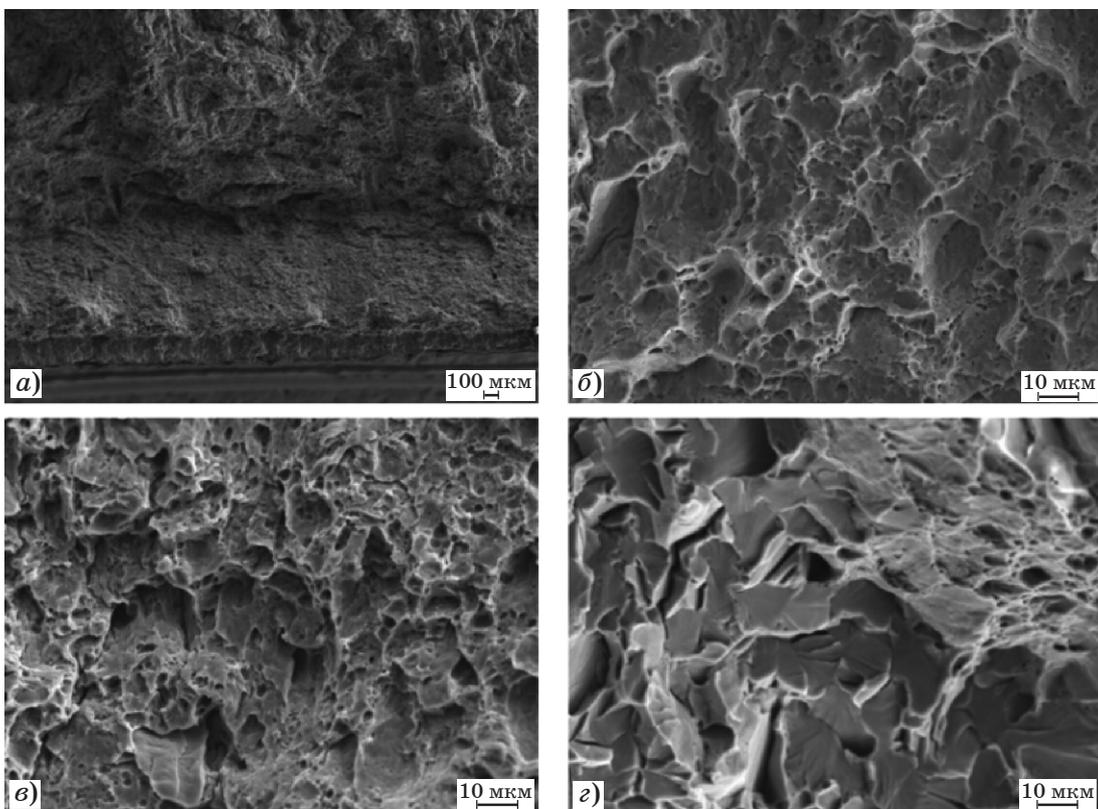
Наличие таких трещин на поверхности разрушения образцов является кардинальным отличием проката после КП + УО, поскольку такая обработка осуществляется в

области температур затрудненной или отсутствующей рекристаллизации стали. Наблюдаемые расслоения могут привести к преждевременному разрушению конструкций при эксплуатации. После ТО в результате полной перекристаллизации кристаллической решетки подобных расслоений практически не наблюдается.

Другим отличительным признаком рельефа разрушения образцов после КП + УО является наличие двух хрупких областей, а не одной, как у образцов после ТО. Хрупкая зона (фиг. 17, д) в конце излома образца, по-



Фиг. 18. Микрорельеф поверхности разрушения образца после ТО, испытанного на статический трехточечный изгиб при температуре  $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зоне: стабильного роста трещины (а, б); перехода от стабильного роста к ускоренному росту трещины (в); хрупкого разрушения (г)



Фиг. 19. Микрорельеф поверхности разрушения образца после КП + УО, испытанного на статический трехточечный изгиб при температуре  $t = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зоне: стабильного роста трещины (а, б); переходной (в) и в зоне хрупкого разрушения (г)

казанного на фиг. 14, *в*, наблюдается перед зоной долома (фиг. 17, *е*).

Часть образцов после КП + УО разрушалась с образованием полностью вязкого излома, но на изломах этих образцов также можно наблюдать характерные полосы, связанные с текстурой материала.

После испытаний при  $t = -60$  °С на изломах образцов, как и на изломах образцов, испытанных на ударный изгиб в области порога хладноломкости, выделены зоны начального сдвигового разрушения, стабильного роста трещины ( $l_c$ ) и хрупкого нестабильного разрушения. При этом вязкая ямочная зона, следующая за сдвиговой и составляющая вместе с ней зону стабильного роста трещины, мала, что свидетельствует о разрушении при температуре ниже КТХ. Для обеих технологий обработки при температуре  $t = -60$  °С общие закономерности изменения микрорельефа изломов, отмеченные для образцов, испытанных при комнатной температуре, сохраняются и остаются подобными, а именно: преимущественно сдвиговый рельеф с небольшими участками волокнистого (вязкого) разрушения в зоне стабильного роста трещины вблизи надреза и хрупкий рельеф с фасетками скола в зоне нестабильного роста (см. фиг. 18, 19).

**Выводы.** 1. При испытании ударных образцов с V-образным надрезом из стали 10ХСНД контролируемая прокатка (КП) с ускоренным охлаждением (УО) приводит к появлению значительной анизотропии свойств, не наблюдаемой при испытании образцов после термической обработки (ТО). Изменение технологии производства с ТО на КП + УО приводит к повышению критической температуры хрупкости в продольном направлении на 10 °С, в поперечном на 18 °С.

2. Критическая температура хрупкости повышается при смене ориентации образцов с продольной на поперечную: при ТО на 23 °С, при КП + УО на 31 °С.

3. Образцы из стали 10ХСНД после КП + УО, ориентированные в поперечном направлении, показывают наименьшую динамическую трещиностойкость при ударном нагружении по сравнению как с продольно ориентированными образцами после КП + УО, так и с образцами после ТО с продольной и поперечной ориентацией.

4. Наличие трещин расслоения на поверхности разрушения образцов после КП + УО в результате затрудненной или отсутствующей

рекристаллизации стали может привести к преждевременному разрушению конструкций при эксплуатации. После ТО в результате полной перекристаллизации кристаллической решетки подобных расслоений практически не наблюдается.

5. Построена экспоненциальная зависимость динамической трещиностойкости от полной работы разрушения, которая может быть полезна при выборе оптимальной структуры материала.

6. По результатам исследования макро- и микрорельефа изломов образцов размерами 350×90×20 мм, испытанных в условиях статического трехточечного изгиба по ГОСТ 6713—2021, установлено, что: применяемые в отечественной практике методики оценки параметров изломов, полученных после статического разрушения образцов на трехточечный изгиб, существенно различаются между собой. Так, результаты исследования одних и тех же изломов по методикам, приведенным в ГОСТ 30456—2021 и ГОСТ Р 52927—2023, могут различаться в 2 раза. Возможно, это связано с тем, что в методике ГОСТ 30456, разработанной для испытания падающим грузом, из рассмотрения исключается существенная часть поверхности излома, что снижает достоверность получаемых данных.

7. Критическая температура хрупкости образцов большего поперечного сечения, испытанных на статический изгиб, выше по сравнению с ее значением при оценке по данным ударных испытаний.

8. Доля вязкой составляющей, определенная по всей площади излома образцов после ТО, выше, чем для образцов после КП + УО, как при комнатной, так и при пониженной температурах, что согласуется с данными, полученными при ударных испытаниях.

9. Общие закономерности изменения микрорельефа изломов образцов для обеих технологий обработки в основном остаются подобными, заметное отличие состоит в увеличенном количестве расслоений в образцах после КП + УО вдоль линий текстуры стали.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Банных, О.А.* Машиностроение : энциклопедия : в 2 т. Т. II-2. Стали. Чугуны / О.А. Банных, Н.Н. Александров, Е.Т. Долбенко ; под ред. Г.Г. Мужина, А.И. Белякова. — М. : Машиностроение, 2001. 784 с.
2. *Эфрон, Л.И.* Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали / Л.И. Эфрон. — М. : Металлургия, 2012. 696 с.

3. *Hamby, G.* High Performance Steel Designers' Guide / G. Hamby, G. Clinton, R. Nimis, M.M. Lwin. — San Francisco : U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2002. 26 p.
4. *Морозов, Ю.Д.* Стали для мостовых конструкций / Ю.Д. Морозов, И.Ф. Пемов, М.Ю. Матросов, Б.Ф. Зинько // *Металлург.* 2019. №9. С.50—61.
5. *Felkel, J.P.* Structural performance and design evaluation of HPS 70W bridge girders / J.P. Felkel, D.C. Rizos, P.H. Ziehl // *J. Constr. Steel Res.* 2007. V.63. №7. P.909—921. DOI : 10.1016/j.jcsr.2006.09.002.
6. *Jia, J.* Comparative study on the stress corrosion cracking of a new Ni-advanced high strength steel prepared by TMCP, direct quenching, and quenching & tempering / J. Jia, Z. Liu, X. Li, C. Du, W. Li // *Mater. Sci. Eng. A.* 2021. V.825. №8. Art.141854. DOI : 10.1016/j.msea.2021.141854.
7. *Jiang, J.* Study on impact toughness of TMCP and quenched and tempered high strength steels / J. Jiang, M. Wu, T.T. Xu, W. Bao, Z.H. Li // *Case Stud. Constr. Mater.* 2024. V.20. Art.e02795. DOI : 10.1016/j.cscm.2023.e02795.
8. *Морозов, Ю.Д.* Высокопрочные трубные стали нового поколения с феррито- бейнитной структурой / Ю.Д. Морозов, М.Ю. Матросов, С.Ю. Настич, А.Б. Арабей // *Металлург.* 2008. №8. С.39—42.
9. *Пемов, И.Ф.* Мостовые стали нового поколения на основе природнолегированных руд Халиловского месторождения / И.Ф. Пемов, Ю.Д. Морозов, А.М. Степашин, Г.Н. Мулько, А.С. Платонов, С.А. Аксютин // *Металлург.* 2004. №9. С.36—39.
10. *Новак, Ю.В.* Результаты испытаний листового проката в термомеханически обработанном состоянии для мостостроения / Ю.В. Новак // *Дороги. Инновации в строительстве.* 2023. №112. С.40—42.
11. *Сергеев, А.А.* Кто болеет за металл? Или как можно разрушить стальное мостостроение / А.А. Сергеев, В.И. Звирь // *Дороги. Инновации в строительстве.* 2023. №111. С.16—21.
12. *Сергеев, А.А.* У каждой проблемы есть «фамилия, имя и отчество» / А.А. Сергеев, В.И. Звирь // *Дороги. Инновации в строительстве.* 2023. № 114. С.20—23.
13. *Банных, И.О.* Структура и механические свойства листового проката из мостовой стали 10ХСНД после термической обработки и контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением / И.О. Банных, В.М. Блинов, Г.А. Куницын, О.А. Банных, Е.И. Лукин, Д.В. Нижельский, Е.В. Блинов, Д.В. Просвирнин, И.В. Ковалько, Д.В. Черненко, Н.Г. Кархина, М.В. Горюнов // *Дороги и мосты.* 2024. №1.
14. *Qiu, H.* Charpy impact behavior of ultra-fine grained steels / H. Qiu, Y. Kawaguchi, C. Shiga ; eds. D. Fr. A.Pineau // *Proc. Charpy Centen. Conf. (Fr. Poitiers, 2—5 Oct. 2001).* 2001. V.1. P.275—282.
15. *Bohme, W.* Results of a DVM round robin on instrumented Charpy testing / W. Bohme // *Eur. Struct. Integr. Soc.* 2002. V.30. №С. P.189—196. DOI : 10.1016/S1566-1369(02)80020-6.
16. *Chaouadi, R.* On the utilization of the instrumented Charpy impact test for characterization the flow and fracture behavior of reactor vessel steels / R. Chaouadi, A. Fabry ; eds. D. Fr. A. Pineau // *Proc. Charpy Centen. Conf. (Fr. Poitiers, 2—5 Oct. 2001).* 2001. V.2. P.577—592.
17. *Гуляев, А.П.* Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Фрактографический метод определения критической температуры хрупкости металлических материалов: Метод. рекомендации МР 5-81 / А.П. Гуляев // *ВНИИ по нормализации в машиностроении.* 1981. 23 с.
18. *Ботвина Л.Р.* Основы фрактодиагностики / Л.Р. Ботвина. — М. : ТЕХНОСФЕРА, 2022. 394 с.
19. *Ohaeri, E.* Hydrogen related degradation in pipeline steel : A review / E. Ohaeri, U. Eduok, J. Szpunar // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2018. V.43. №31. P.14584—14617. DOI : 10.1016/j.ijhydene.2018.06.064.