

УДК 620.184.6+539.563+620.178.3+539.42

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ, ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 10ХСНД ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ

©2024 г. Л.Р. Ботвина^{1*}, М.Р. Тютин^{1*}, Ю.А. Демина^{1*}, Е.Н. Белецкий^{1*},
Д.В. Просвирнин^{1*}, Г.А. Куницын^{2*}, Д.В. Нижельский^{2*}

^{1*}ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва
E-mail: lbotvina@imet.ac.ru

^{2*}АО «Уральская Сталь», Новотроицк

Поступила в редакцию 12 апреля 2024 г.

После доработки 27 июня 2024 г. принята к публикации 9 июля 2024 г.

Изучено влияние термической обработки (ТО по режиму: температура аустенитизации в интервале 910—960 °С, температура отпуска в интервале 600—680 °С) и контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением (КП+УО по режиму: температура конца прокатки в интервале 800—900 °С) на механические характеристики и рельеф поверхности изломов стали 10ХСНД при статическом и циклическом нагружении. Анализ полученных данных показал, что после ТО значения трещиностойкости K_Q для образцов, ориентированных как вдоль, так и поперек направления прокатки, выше чем у образцов после КП + УО. Циклическая прочность стали после ТО превосходит ее значения для образцов после КП. Исследованиями макро- и микрорельефа поверхности изломов выявлены многочисленные расслоения на изломах образцов после КП, присутствием которых, вероятно, и объясняется снижение циклической прочности.

Ключевые слова: сталь 10ХСНД; термическая обработка; контролируемая прокатка; трещиностойкость; циклическая прочность; фрактография.

Низколегированная конструкционная сталь 10ХСНД служит объектом многих исследований [1—3], поскольку широко используется в промышленности. Так, в задачи исследования [3] входили оценка трещиностойкости и изучение механизма разрушения сварных металлоконструкций, изготовленных из стали 10ХСНД, с учетом влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. В исследовании установлено, что средние значения трещиностойкости образцов, вырезанных из основного материала, сварного шва и зоны термического влияния, составляли 90—105 МПа·м^{1/2}. Причем некоторые образцы из основного материала после его длительной эксплуатации отличались пониженной трещиностойкостью, вызванной, по мнению авторов [3], расслоениями, наблюдаемыми на поверхности изломов, образование которых связали с повышенным содержанием кремния и серы. Как отмечено в работе [4] И.Ф. Пемовым с сотрудниками, путем снижения концентрации серы, фосфо-

ра, водорода и измельчения структуры можно достичь нового уровня качества проката.

В работах [5, 6] выявлены основные факторы, вызывающие развитие расслоений, определены их критические значения, обеспечивающие отсутствие слоистого разрушения, в частности, значения удлинения и доли вязкой составляющей в изломах надрезанных образцов при статическом испытании. Было изучено влияние содержания серы и водорода на среднюю длину расслоений при статическом испытании и свойства материала в Z-направлении. Эти исследования легли в основу развития технологии производства проката для мостостроения [7], в том числе с использованием контролируемой прокатки (КП) [8], применение которой для стали 10ХСНД может быть затруднено вследствие узкого температурного интервала режимов КП [4, 9]. Исследованию технологии КП толстолистового проката для строительных конструкций, в том числе из стали 10ХСНД, посвящена статья [10], авторы которой пред-

ложили режим, при котором уменьшается полосчатость, а следовательно, и анизотропия свойств, что повышает эксплуатационные свойства проката. Эти свойства зависят также и от влияния сварки на структуру и прочностные характеристики стали после КП [11].

Данное исследование проведено с целью сравнения механических характеристик и определяющих эти характеристики механизмов разрушения стали 10ХСНД после термической обработки (ТО) и КП с ускоренным охлаждением (УО) при статическом и циклическом нагружении. Настоящая работа является продолжением исследования влияния режимов ТО на механизмы разрушения стали 10ХСНД [12].

Материал и методы испытаний. Исследование влияния режимов обработки и ориентации образцов по отношению к направлению прокатки на механические свойства

и механизмы разрушения стали 10ХСНД выполняли после ее ТО (режим: температура аустенитизации в интервале 910—960 °С, температура отпуска в интервале 600—680 °С) и после КП + УО (режим: температура конца прокатки в интервале 800—900 °С). Выплавка, горячая прокатка и ТО проката толщиной 20 мм в промышленных условиях проведены на предприятии АО «Уральская Сталь». Химический состав и механические свойства исследуемой стали представлены в табл. 1 и 2 [12, 13].

Структура исследуемой стали в состоянии после ТО состоит из зернистого перлита и отпущенного мартенсита, а после КП + УО — феррита и перлита с существенной разнотерностью и строчечными включениями [13].

Испытания на статическую трещиностойкость компактных образцов с краевой трещиной, геометрия которых представлена на фиг. 1, а, проводили на машине Instron 3382

Таблица 1

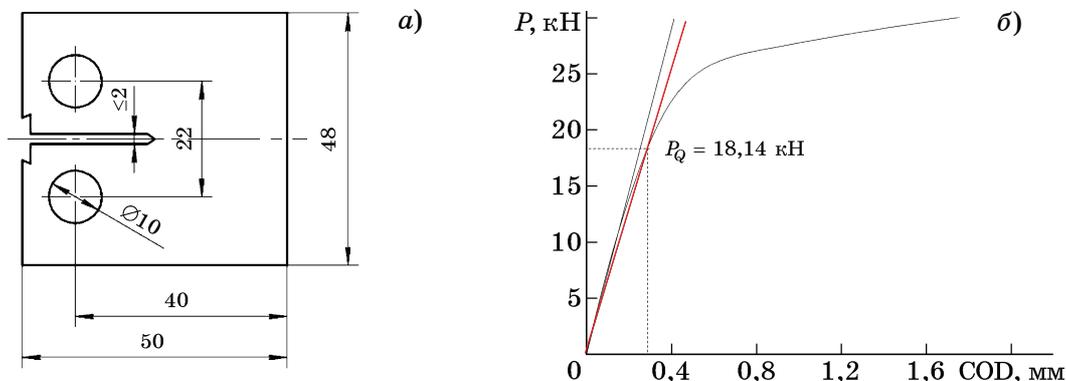
Химический состав, %, исследуемой стали 10ХСНД [12, 13]
(остальное — Fe)

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	0,1070	0,579	1,14	0,499	0,552	0,418	0,041	0,0043	0,0076	0,0022

Таблица 2

Механические свойства исследуемой стали [12, 13]

Обработка	σ_T	σ_B	$\delta_5, \%$	$KCV_{-20}, Дж/см^2$
	МПа			
ТО	415	580	27	294—311
КП + УО	410	560	24,5	118—103



Фиг. 1. Геометрия образца для испытания на статическую трещиностойкость (а) и зависимость нагрузки P от раскрытия вершины трещины COD (б)

со скоростью нагружения 0,2 мм/мин согласно ГОСТ 25.506—85¹.

Для выравнивания боковых поверхностей и обеспечения плоскопараллельности образцы были отшлифованы, в результате чего их фактическая толщина составила ~17 мм. Согласно ГОСТ 25.506—85, на машине Instron 8801 в вершине надреза зарождали усталостную трещину (УТ) длиной 0,45—0,55 ширины образца при асимметрии цикла $R = 0,1$, частоте $\nu = 30$ Гц и снижающемся размахе ΔK , что обеспечивало отсутствие пластической деформации в вершине трещины, влияющей на величину трещиностойкости. Длину трещины измеряли автоматически при помощи датчика раскрытия берегов трещины, который крепили на образце в специально подготовленном углублении (см. на фиг. 1, а).

Характеристику трещиностойкости оценивали по началу нестабильного роста трещины в соответствии с ГОСТ 25.506—85.

В результате испытаний получали диаграммы нагрузка—раскрытие трещины (пример см. на фиг. 1, б), по которым методом 5%-ной секущей определяли значения расчетной нагрузки P_Q , действующей на образец. По значению P_Q оценивали характеристику трещиностойкости K_Q по соотношению:

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} 13,74 \left[1 - 3,380 \left(\frac{l}{b} \right) + 5,572 \left(\frac{l}{b} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где t, b — соответственно толщина и ширина образца; l — длина исходной усталостной трещины.

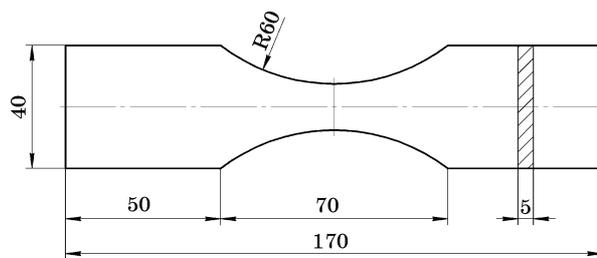
Затем в соответствии с ГОСТ 25.506—85 оценивали критерий корректности определения трещиностойкости, т.е. отношение расчетной толщины образца t_{PK} к фактической t :

$$t_{PK}/t \leq 1, \quad (2)$$

где $t_{PK} = 2,5(K_Q/\sigma_{0,2})^2$; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала. При выполнении условия корректности (2) значение K_Q приравнивается к K_{Ic} .

По соотношению (1) также вычисляли значение K_c , подставляя вместо P_Q значение максимальной нагрузки при нагружении P_c .

¹ГОСТ 25.506—85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.



Фиг. 2. Геометрия образца для испытаний на циклическую прочность

Всего на трещиностойкость испытано 12 образцов после ТО и после КП + УО, ориентированных как в продольном, так и поперечном направлении относительно направления прокатки (по три образца на каждое состояние).

Испытания на многоцикловую усталость образцов, геометрия которых представлена на фиг. 2, проводили на машине Instron 8801 согласно ГОСТ 25.502—79² при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0,1$ и частоте 30 Гц. Вырезку образцов проводили таким образом, чтобы их ось была перпендикулярна направлению прокатки. Всего было испытано 19 образцов после ТО и 20 образцов после КП + УО.

Угол наклона левой ветви кривой усталости определяли с использованием метода наименьших квадратов в соответствии с ГОСТ 25.502—79 и данными справочника [14]; предел выносливости оценивали по тому же ГОСТу на уровне 50%-ной вероятности разрушения.

Макро- и микрорельеф поверхности изломов образцов, испытанных на трещиностойкость и циклическую прочность, исследовали на оптическом микроскопе ЛОМО МСП-2 с фотоадаптером и электронном сканирующем микроскопе Jeol JXA-iSP 100.

Результаты исследований и их обсуждение. Статическая трещиностойкость, макро- и микрорельеф поверхности изломов образцов. Результаты испытаний образцов после ТО и после КП + УО на трещиностойкость представлены в табл. 3. Видно, что условие корректности определения K_{Ic} не выполнено, так как отношение t_{PK}/t для всех испытанных образцов оказалось больше единицы.

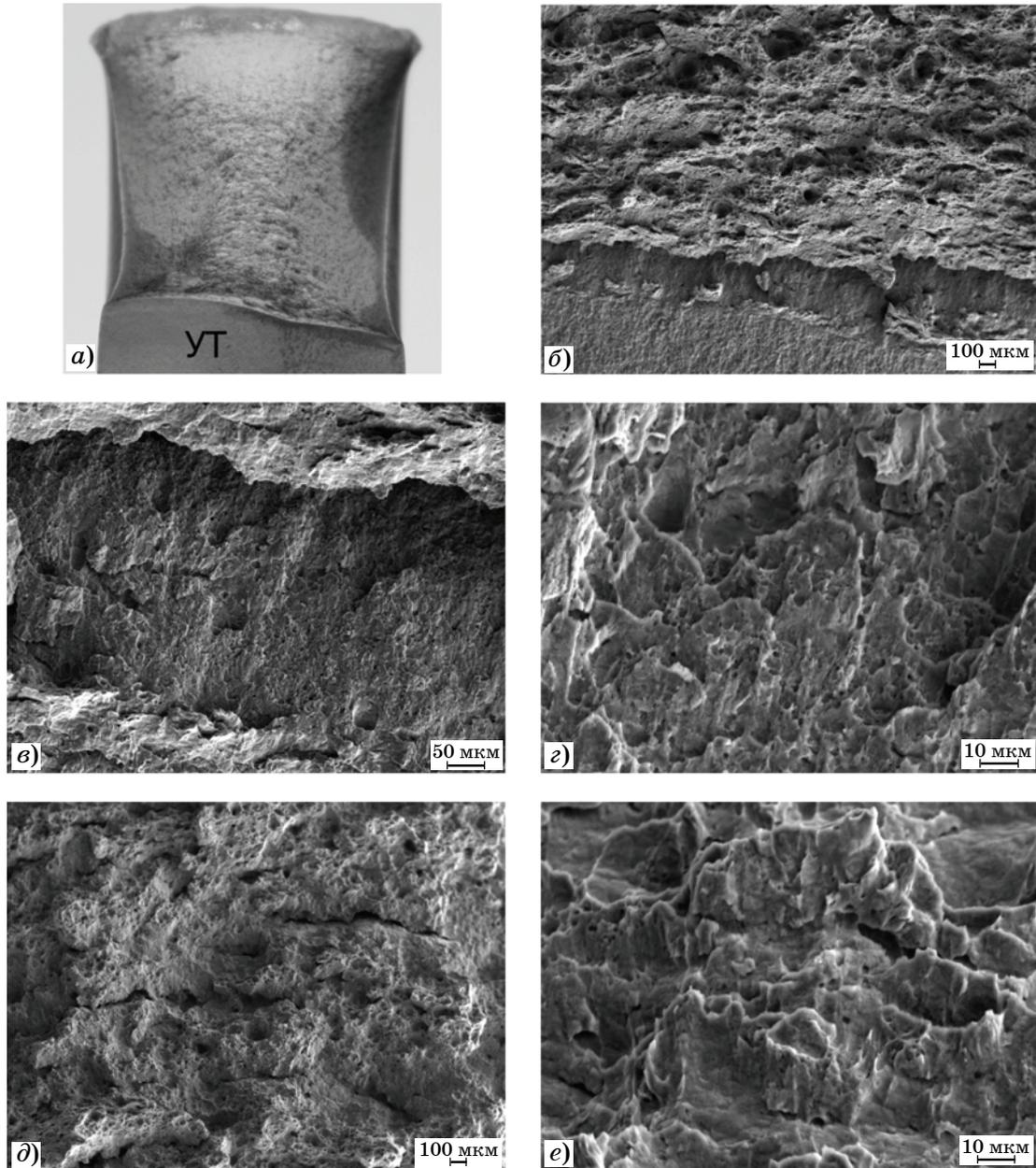
²ГОСТ 25.502—79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

Таблица 3

Результаты испытаний на трещиностойкость образцов в состоянии после ТО и после КП + УО

Обработка	Образец	K_Q	K_c	t_{PK}/t
		МПа·м ^{1/2}		
ТО	Поперечный	53,7±5,2	109,7	1,8±0,3
	Продольный	52,0±4,7	—	1,8±0,3
КП + УО	Поперечный	49,2±5,9	—	1,6±0,4
	Продольный	48,4±1,3	—	1,5±0,1

По результатам расчетов установлено, что для получения корректных значений статической трещиностойкости K_{Ic} в условиях плоскодеформированного состояния необходимо изготовить образцы из исследуемой стали толщиной не менее 45 мм. За характеристику трещиностойкости принято расчетное значение K_Q , которое, как правило, меньше истинного (корректного) значения K_{Ic} , поэтому полученные в данной работе значения трещиностойкости K_Q можно использовать как оценочные [15].



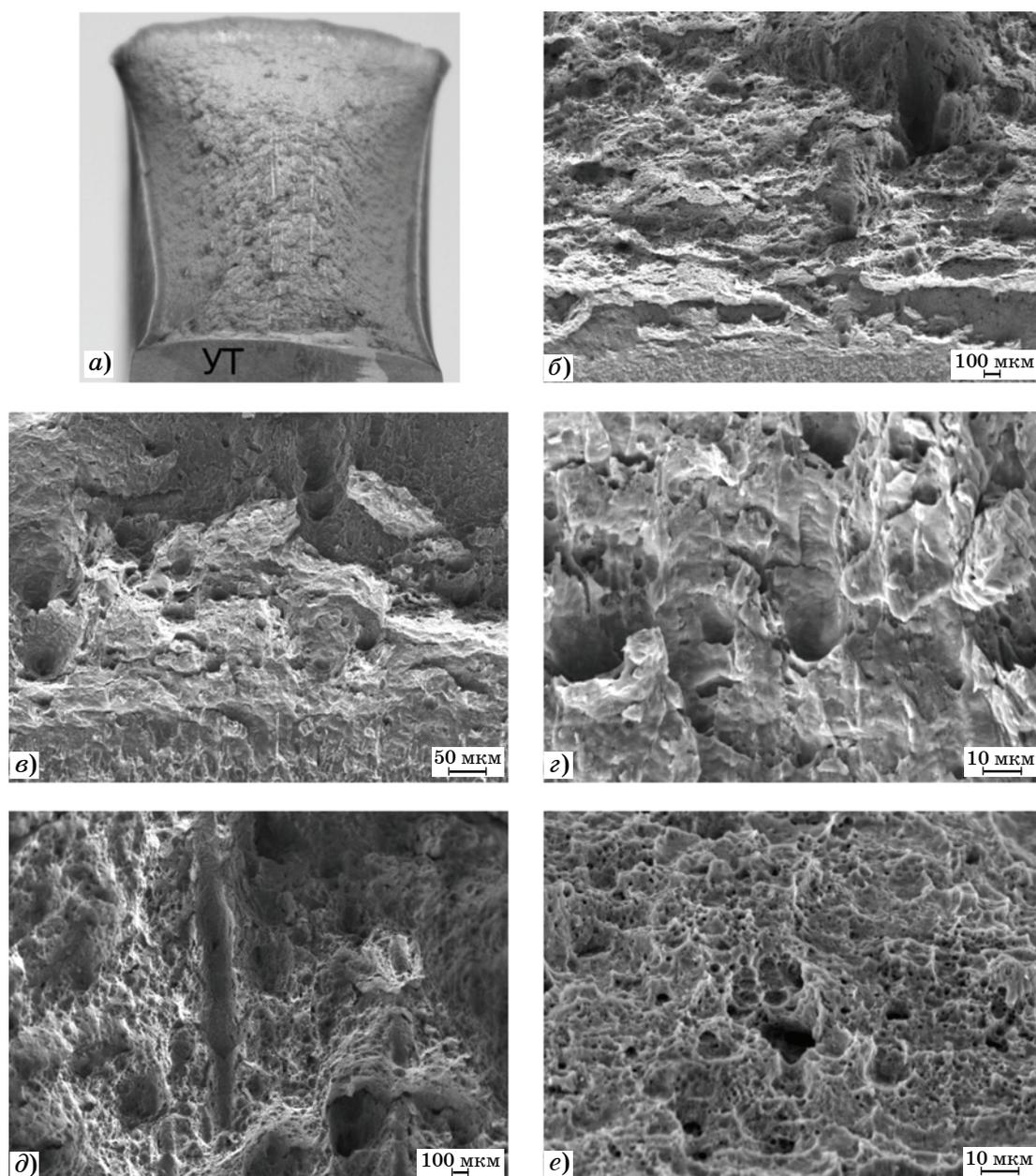
Фиг. 3. Рельеф поверхности излома поперечно ориентированного образца после ТО и испытаний на трещиностойкость: а — общий вид (УТ — усталостная трещина, предварительно нанесенная в вершине надреза); б — сдвиговая зона в вершине УТ; в — зона зарождения УТ; г — сдвиговая зона у вершины УТ; д — зона стабильного роста; е — зона долома

Полученное для поперечного образца после ТО значение трещиностойкости $K_c = 109,7$ МПа·м^{1/2} согласуется с результатами испытаний образцов из стали 10ХСНД, приведенными в работах [2] ($K_c = 100$ МПа·м^{1/2}) и [16] ($K_c = 98$ МПа·м^{1/2}).

Анализ экспериментальных данных показал, что значения трещиностойкости K_Q для образцов после ТО, ориентированных как вдоль, так и поперек направления прокатки, выше по сравнению с образцами после КП + УО. Так, для поперечно ориентированных образцов эта разница составляет

9,1%, а для продольно ориентированных — 7,4% (см. табл. 3).

Исследован рельеф поверхности разрушения образцов, испытанных на трещиностойкость. На фиг. 3—6 представлены фотографии поверхности изломов испытанных образцов двух обработок и двух ориентаций. Механизм разрушения образцов обеих обработок носит схожий характер. Перед вершиной предварительно нанесенной УТ на изломах образцов наблюдается область с характерным сдвиговым рельефом (фиг. 3—6, а—г), за которой следует область вязкого



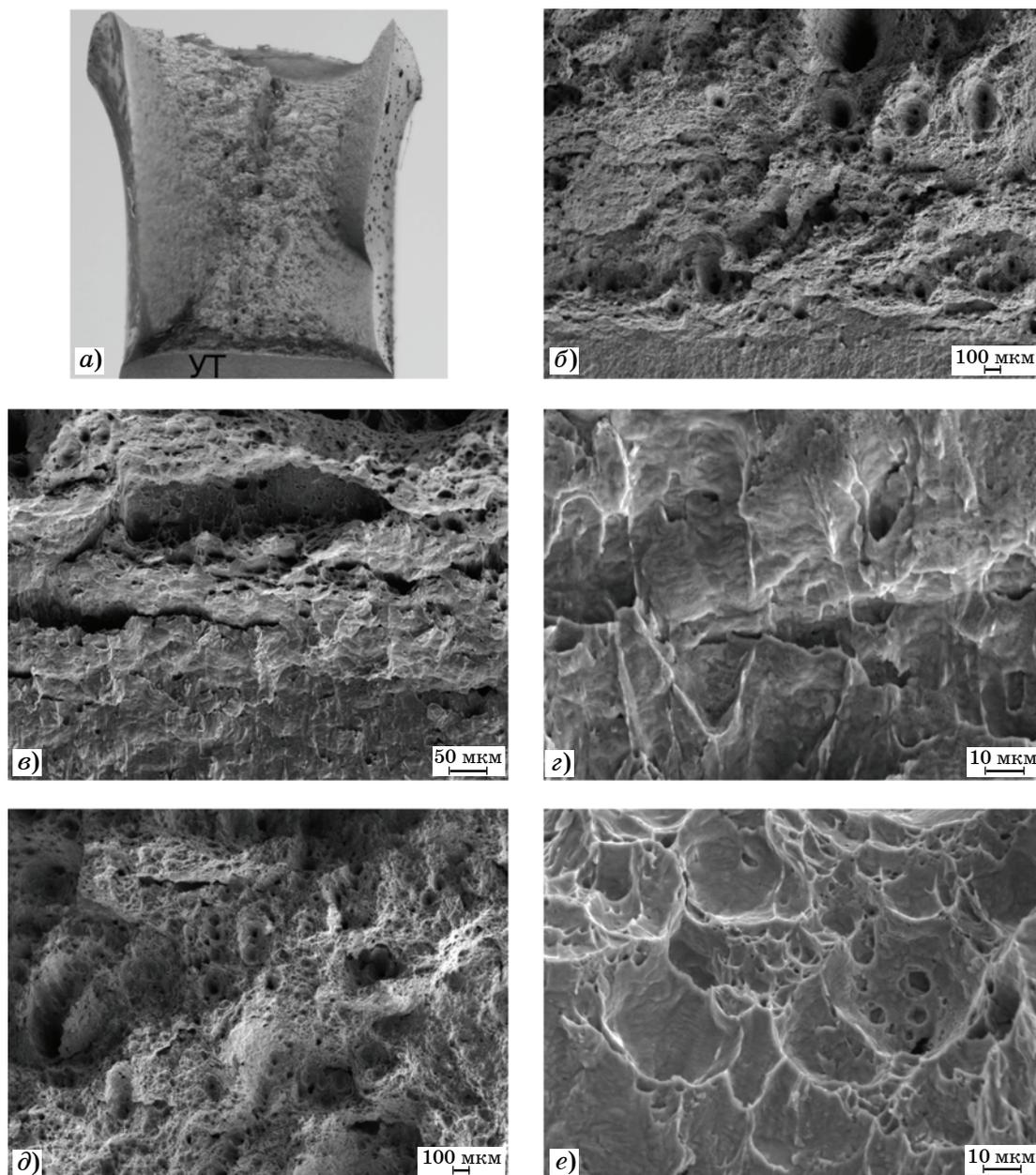
Фиг. 4. Рельеф поверхности излома продольно ориентированного образца после ТО после испытаний на трещиностойкость: а — общий вид; б — вершина УТ; в — зона зарождения трещины; г — сдвиговая зона у вершины УТ; д — зона стабильного роста; е — зона долома

разрушения (фиг. 3—6, *a, д*). Область долома образцов имеет сдвиговый рельеф (фиг. 3—5, *e*), за исключением продольно ориентированного образца после КП + УО, рельеф зоны долома которого имеет квазихрупкий характер (фиг. 6, *e*). Наличие квазихрупкого рельефа в зоне долома свидетельствует о том, что условия испытания на трещиностойкость способствуют повышению критической температуры хрупкости (КТХ) стали после КП + УО.

Влияние ориентации образцов проявляется в наличии характерных следов текстуры на изломах продольно ориентированных

образцов как после ТО (см. фиг. 4, *a, д*), так и после КП + УО (см. фиг. 6, *a, д*). Если для первых эти следы носят единичный характер, то на изломе образца после КП + УО зона с выраженным текстурным рельефом занимает большую часть поверхности. Похожий рельеф наблюдался на изломах продольных образцов, испытанных на ударный изгиб [12].

Наличие выраженного текстурного рельефа на изломе продольно ориентированных образцов после КП + УО свидетельствует о структурной анизотропии исследуемой стали в этом состоянии. Хотя в настоящем исследовании, выполненном на образцах из



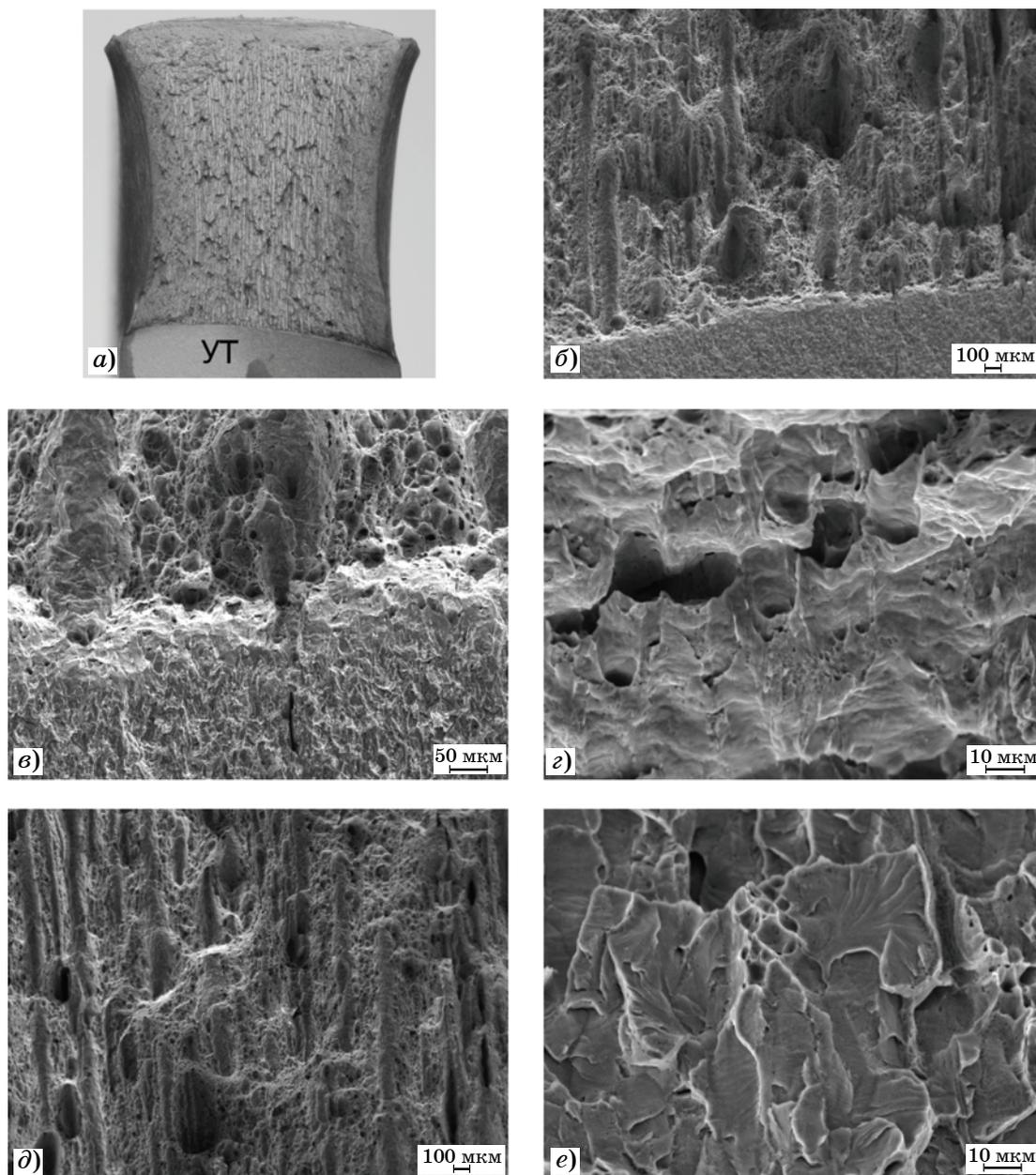
Фиг. 5. Рельеф поверхности излома поперечно ориентированного образца после КП + УО после испытаний на трещиностойкость: *a* — общий вид; *b* — вершина УТ; *c* — зона зарождения УТ; *г* — сдвиговая зона у вершины УТ; *д* — зона стабильного роста; *e* — зона долома

стали в состоянии поставки, не было выявлено существенных трещин и расслоений вдоль направления текстуры, ее наличие при длительной эксплуатации, воздействии нагрузок и неблагоприятных факторов окружающей среды может привести к образованию ориентированных вдоль направления прокатки трещин и расслоений. Подобный механизм деградации свойств и структуры наблюдается в трубных сталях после КП [17, 18].

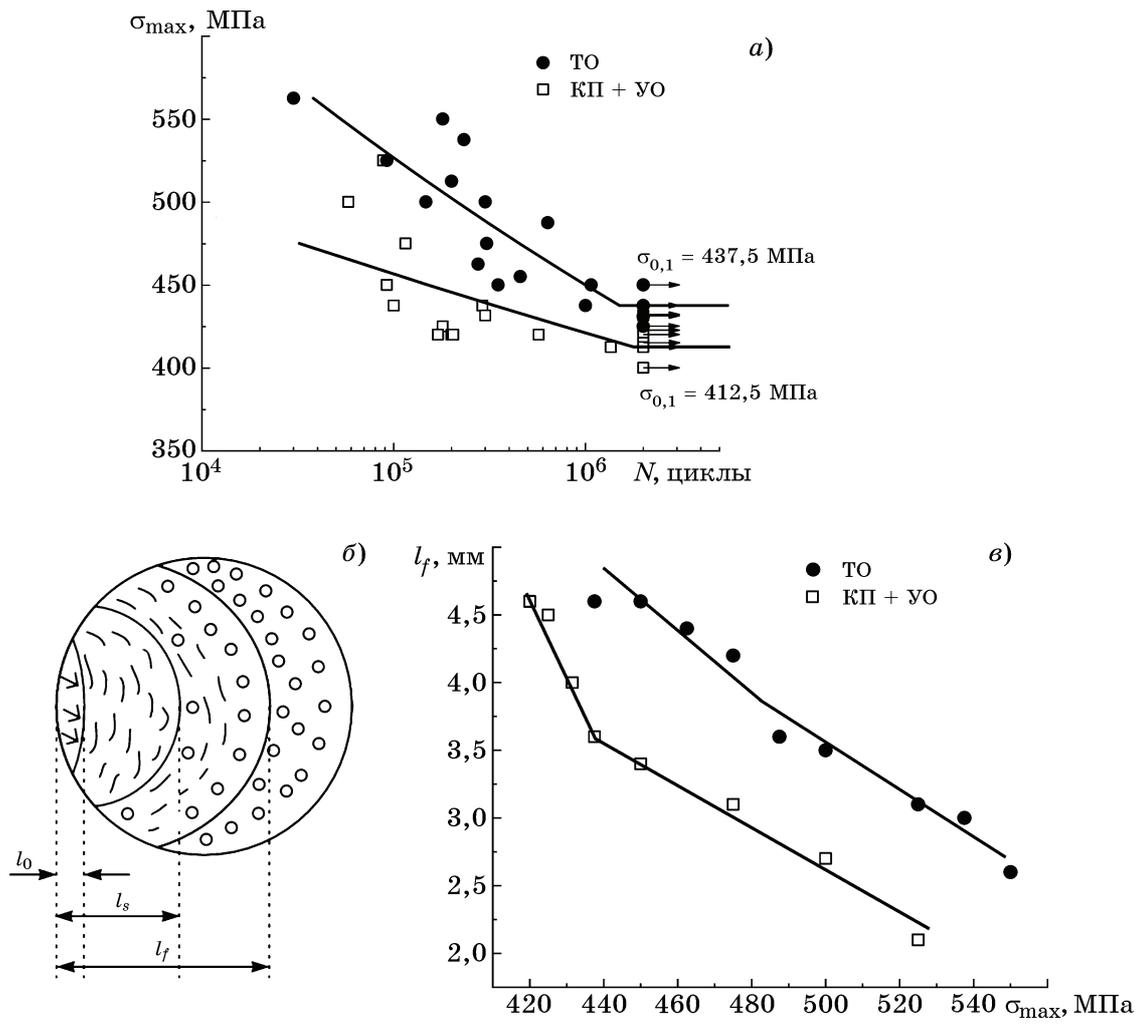
Испытания образцов на статическую трещиностойкость показали, что значения трещиностойкости K_Q для образцов после ТО, ориентированных как вдоль, так и поперек

направления прокатки, выше по сравнению со значениями трещиностойкости после КП + УО: для поперечно ориентированных образцов эта разница составляет 9,1%, а для продольно ориентированных — 7,4%.

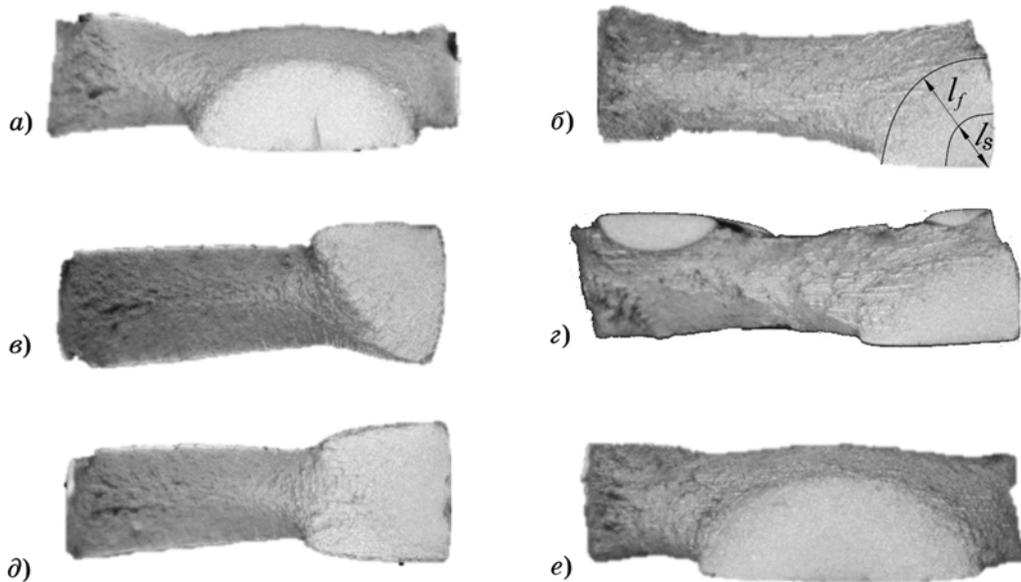
Рельеф поверхности разрушения продольно ориентированных образцов содержит следы текстуры, причем если на изломе образца после ТО текстурные следы носят единственный характер, то в образце после КП + УО большую часть поверхности излома занимает зона с выраженным текстурным рельефом. Кроме того, отличительной особенностью этого образца является квазихрупкий



Фиг. 6. Рельеф поверхности излома продольно ориентированного образца после КП + УО после испытаний на трещиностойкость: *a* — общий вид; *b* — вершина УТ; *c* — зона зарождения УТ; *z* — сдвиговая зона у вершины УТ; *d* — зона стабильного роста; *e* — зона долома



Фиг. 7. Кривые усталости образцов после ТО и после КП + УО (а), а также схема макрозон на усталостных изломах с преимущественным микрорельефом излома [18] (б) и зависимости протяженности зоны l_f от максимального напряжения циклического нагружения σ_{max} образцов после ТО и после КП + УО (в)



Фиг. 8. Макрорельеф поверхности усталостных изломов образцов стали после ТО (а, в, д) и после КП (б, г, е) при амплитудах напряжения 500 (а, б), 475 (в, г) и 437 МПа (д, е)

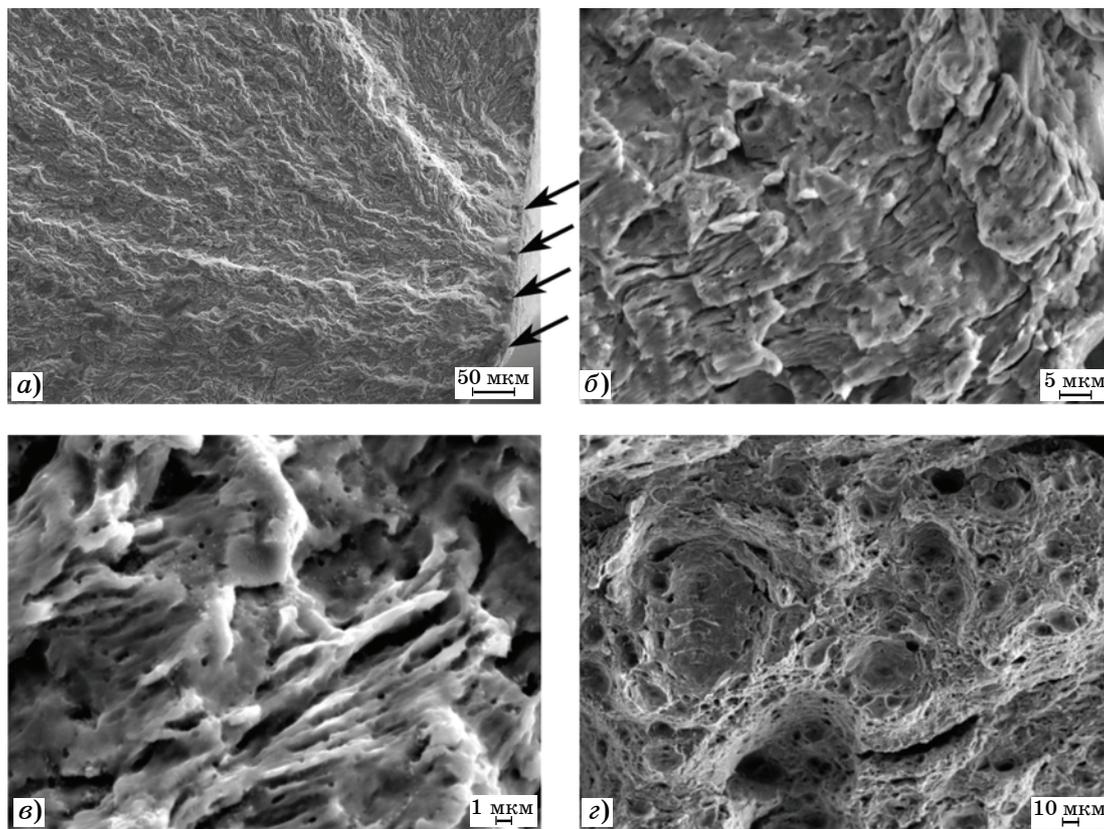
рельеф зоны долома, наличие которого свидетельствует о том, что условия испытаний на трещиностойкость способствуют повышению КТХ стали после КП + УО.

Циклическая прочность, макро- и микрорельеф поверхности изломов усталостных образцов. На фиг. 7, а представлены кривые усталости образцов после ТО и после КП + УО. Предел выносливости для образцов после ТО, как следует из приведенных данных, составляет $\sigma_{0,1} = 437,5$ МПа, что выше на 6% значения предела выносливости образцов после КП + УО ($\sigma_{0,1} = 412,5$ МПа), поэтому при одинаковой амплитуде усталостного нагружения долговечность образцов после ТО выше, что обеспечивает повышенную работоспособность исследуемой стали в условиях циклического нагружения.

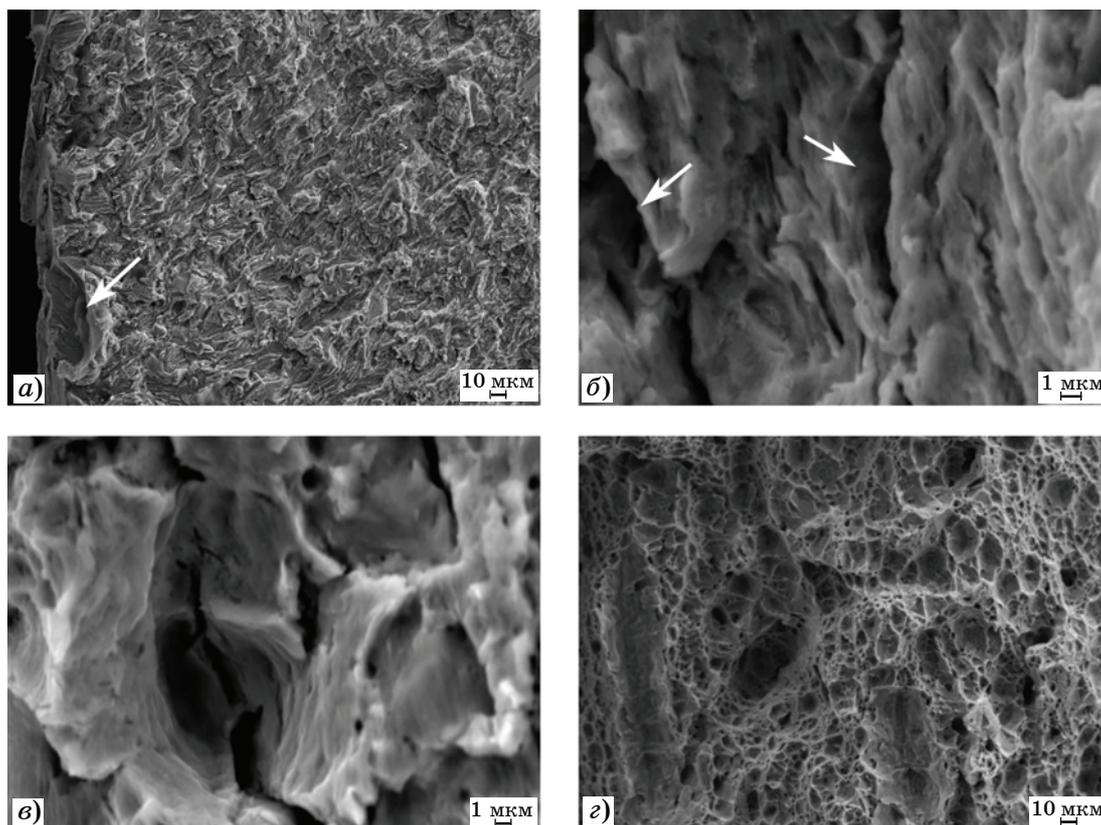
По данным [19] на усталостных изломах иногда визуально или при небольших увеличениях можно обнаружить несколько зон, характеризующихся определенным механизмом разрушения. На схеме фиг. 7, б представлен вид излома, характерный для вязкого усталостного разрушения; стрелками обозначен сдвиговый рельеф в начальной

зоне l_0 , штрихами — преимущественный микрорельеф с образованием усталостных бороздок в зоне стабильного роста l_s и смешанный микрорельеф в переходной зоне ускоренного роста усталостной трещины l_f с образованием бороздок и вязких ямок, показанных полыми кружками. Последующее нестабильное развитие связано с преобладанием механизмов статического однократного разрушения.

Макроизломы усталостных образцов после обеих обработок, полученные при одинаковой амплитуде напряжения (500, 475 и 437 МПа), приведены на фиг. 8. На изломах выделены зоны усталостного разрушения, отвечающие схеме на фиг. 8, б. Видно, что в обоих случаях обработок усталостное разрушение начинается из очага, располагающегося либо на поверхности образца (фиг. 8, а, е), либо в месте пересечения граней образца (фиг. 8, б, в). На образцах после КП + УО число очагов возрастает (фиг. 8, г). На фиг. 7, б показаны выделенные зоны l_s и l_f , причем если зону l_f легко измерить при исследовании излома, то для выделения зоны l_s собственного усталостного разрушения часто требу-



Фиг. 9. Микрорельеф поверхности излома образца после ТО и циклических испытаний при $\sigma_{\max} = 450$ МПа: а — в области очага зарождения трещины; б, в — в зоне стабильного и ускоренного роста трещины; г — в зоне долома



Фиг. 10. Микрорельеф поверхности излома образца после КП + УО и циклических испытаний при $\sigma_{\max} = 450$ МПа: *a* — в области очага зарождения трещины; *б, в* — в зоне стабильного и ускоренного роста трещины; *з* — в зоне долома

ется более детальное изучение рельефа поверхности усталостного излома.

Результаты измерения длины УТ, приведенные на фиг. 7, *в*, показывают, что после ТО зависимость длины зоны от напряжения лежит выше такой же зависимости после КП + УО, что согласуется с большей долговечностью стали после ТО (см. фиг. 7, *а*).

При изучении поверхности макрозон излома образца после ТО выявлены следующие разновидности микрорельефа: очаги на боковой поверхности образца и гребни, разделяющие плоскости, по которым из очагов (показаны стрелками) развиваются трещины (фиг. 9, *а*); усталостные бороздки (фиг. 9, *б, в*) — преимущественный механизм усталостного разрушения, шаг которых растет с увеличением длины трещины; вязкий ямочный микрорельеф в зоне долома (фиг. 9, *з*).

Микрорельеф излома после КП + УО отражает увеличенное число расслоений после КП. Так, очаги УТ образуются в местах расслоений, показанных на фиг. 10, *а* стрелками. Расслоения обнаруживаются и в зонах стабильного и ускоренного роста трещи-

ны (фиг. 10, *б, в*), а также в зоне долома образца (фиг. 10, *з*).

Выводы. 1. Проведенные исследования показали, что трещиностойкость и циклическая прочность стали 10ХСНД после термической обработки (температура аустенитизации в интервале 910—960 °С, температура отпуска в интервале 600—680 °С) выше по сравнению с подобными характеристиками стали, оцененными после контролируемой прокатки (температура конца прокатки в интервале 800—900 °С) с ускоренным охлаждением. Снижение прочностных характеристик может быть следствием наблюдаемых расслоений в стали после контролируемой прокатки, обнаруженных путем детального анализа макро- и микрорельефа изломов образцов при статическом и циклическом нагружении.

2. Анализ влияния текстуры прокатки на трещиностойкость и рельеф поверхности изломов образцов показал, что контролируемая прокатка вызывает большее снижение трещиностойкости по сравнению с термической обработкой.

3. Отмечено, что квазихрупкий рельеф зоны долома продольных образцов после контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, испытанных на трещиностойкость, в отличие от вязкого микрорельфа изломов образцов после термической обработки свидетельствует о повышении критической температуры хрупкости стали после контролируемой прокатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горицкий, В.М.* Тепловая хрупкость сталей / В.М. Горицкий. — М. : Metallurgizdat, 2007. 381 с.
2. *Горицкий, В.М.* Влияние длительного нагрева на сопротивление хрупкому разрушению термоулучшенной стали 10ХСНД / В.М. Горицкий, Г.Р. Шнейдеров // Деформация и разрушение материалов. 2006. №3. С.17—21.
3. *Челноков, А.В.* Экспериментальные исследования трещиностойкости конструкций из низколегированной стали 10ХСНД / А.В. Челноков, М.Н. Ерофеев // XXXII Межд. инновационная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения : сб. тр. конф. (Москва, 02—04 декабря 2020 г.). — М. : Изд. ФГБУН Ин-т машиноведения им. А.А. Благоврадова РАН, 2021. С.182—188.
4. *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.
5. *Пемов, И.Ф.* Повышение механических свойств толстолистного проката в направлении толщины / И.Ф. Пемов, О.В. Носоченко // *Металлург.* 2003. №11. С.49—52.
6. *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.
7. *Шафигин, Е.К.* Листовой прокат сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА для мостостроения / Е.К. Шафигин, С.А. Голованенко // *Сталь.* 2000. №4. С.66—70.
8. *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.
9. *Эфрон, Л.И.* *Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали* / Л.И. Эфрон. — М. : Metallurgizdat, 2012. 696 с.
10. *Laukhin, D.* The elaboration of modernized technology of controlled rolling directed at the formation of high strengthening and viscous qualities in HSLA steel / D. Laukhin, O. Beketov, N. Rott, A. Schudro // *Solid State Phenom.* 2019. V.291. P.13—19. DOI : 10.4028/www.scientific.net/SSP.291.13.
11. *Laukhin, D.* Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels / D. Laukhin, V. Pozniakov, O. Beketov, N. Rott, A. Shchudro // *Key Eng. Mater.* 2020. V.844. P.146—154. DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.844.146.
12. *Ботвина, Л.Р.* Влияние режимов обработки и ориентации образцов на механические характеристики и механизмы разрушения стали 10ХСНД при ударном и статическом изгибе / Л.Р. Ботвина, М.Р. Тютин, Ю.А. Демина, Е.Н. Белецкий, Г.А. Куницын, Д.В. Нижельский // *Металлы.* 2024. №4. С.51—67.
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. *Троценко, В.Т.* Сопротивление усталости металлов и сплавов : справочник. Ч.1. / В.Т. Троценко, Л.А. Сосновский. — Киев : Наукова думка, 1987. 510 с.
15. *Маркочев, В.М.* О критериях истинности значения K_{Ic} при испытании на вязкость разрушения сталей средней и низкой прочности / В.М. Маркочев, В.Ю. Гольцев, А.П. Бобринский // *Физика и механика деформации и разрушения.* — М. : Атомиздат, 1977. Вып.4. С.38—41.
16. *Челноков А.В.* Исследование трещиностойкости металлоконструкций подъемных сооружений / А.В. Челноков // *Новые материалы и перспективные технологии : четвертый междисциплинарный науч. форум с междунар. участием (Москва, 27—30 ноября 2018 г.).* — М. : Буки Веди, 2018. Т.1. С.876—881.
17. *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.
18. *Демина, Ю.А.* Влияние длительной эксплуатации на физико-механические свойства и механизмы разрушения трубных сталей класса прочности X70 / Ю.А. Демина, М.Р. Тютин, А.Ю. Марченков, В.П. Левин, Л.Р. Ботвина // *Деформация и разрушение материалов.* 2021. Т.12. С.23—35. DOI : 10.31044/1814-4632-2021-12-23-35.
19. *Ботвина, Л.Р.* Основы фрактодиагностики / Л.Р. Ботвина. — М. : ТЕХНОСФЕРА, 2022. 394 с.