

УДК 620.194.22;548.4;537.533.73

## ВЛИЯНИЕ ТИПА И МОРФОЛОГИИ ГРАНИЦ ЗЕРЕН НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ В НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

© 2019 г. М. М. Кантор<sup>1,\*</sup>, В. В. Судьин<sup>1</sup>, К. А. Солнцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,  
Россия, 119334 Москва, Ленинский пр., 49

\*e-mail: kantor@imet.ac.ru

Поступила в редакцию 29.07.2018 г.

После доработки 12.10.2018 г.

Принята к публикации 17.10.2018 г.

Предложена методика определения типа границ зерен путем их трехмерной реконструкции при ориентационном картировании, в которой используется перебор возможных ориентаций для определения минимального угла вращения решеток. Исследовано их влияние на сопротивление коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) в малоуглеродистой низколегированной стали в околонейтральной среде. Определены кристаллографические и геометрические параметры перехода трещин КРН от межзеренного к транскристаллитному пути роста.

**Ключевые слова:** характер границ зерен, зарождение и распространение трещин, переход от межзеренного к транскристаллитному разрушению, дифракция отраженных электронов

**DOI:** 10.1134/S0002337X19040080

### ВВЕДЕНИЕ

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) – синергетический процесс образования трещин в результате одновременного длительного воздействия коррозионно-активной среды и механических напряжений на металл. КРН спонтанно реализуется в весьма специфических условиях при эксплуатации подземных трубопроводов. В этих случаях КРН обусловлено тем, что электролит проникает через разрывы изоляционного покрытия, застаивается, продукты коррозии вызывают отслаивание изоляционного покрытия от металла внешней поверхности труб, увеличивая площадь коррозионного воздействия. Внешнее проявление КРН магистральных трубопроводов состоит в образовании колоний длинных полуэллиптических трещин, вытянутых перпендикулярно оси растягивающего напряжения, возникающего вследствие давления транспортируемого продукта.

Несмотря на то что классификация механизмов КРН строится на кислотности коррозионной среды, основным их различием является путь прохождения трещины. В околонейтральной среде (при pH 5.5–8) путь трещины транскристаллитный, в щелочной (при pH 9–12) – межзеренный [1, 2].

Поскольку образование трещин КРН – процесс достаточно длительный, уже при глубине трещины 2–3 мкм пространство между ее берегами заполняется продуктами коррозии [3]. Принимая во внимание то, что размер зерен феррита в микроструктуре современных трубных сталей после контролируемой прокатки составляет 5–7 мкм, а в сталях после закалки с отпуском даже 2–3 мкм [4], достоверность определения механизма излома по фрактографическим данным представляется сомнительной [5].

В настоящее время для изучения КРН широко применяется метод дифракции отраженных электронов (ДОЭ). Этим методом можно достоверно определить путь распространения трещины на основании анализа карт ориентаций зерен [6, 7].

Ранее отмечалось, что зарождение трещин КРН, даже в условиях, для которых характерен их транскристаллитный рост, происходит на границах зерен и фаз [6, 8]. Из этого следует, что на некоторой глубине под поверхностью металла происходит переход от межзеренного распространения трещин к транскристаллитному.

Триггерами перехода могут служить различные факторы, приводящие к тому, что распространение трещины по границе зерна становится менее выгодным, чем по телу зерна. При изуче-

**Таблица 1.** Состав стали 17Г1С-У в мас. %

Fe	C	S	Si	Mn	Ni	P	Cu	Cr
97.493	0.159	0.015	0.524	1.496	0.041	0.017	0.051	0.123
Mo	Al	Ti	V	W	Nb	As	Ca	N
0.003	0.007	0.006	0.005	0.038	0.010	0.010	0.001	0.002

нии межзеренного КРН на примерах различных сплавов было установлено, что особой сопротивляемостью к КРН обладают малоугловые [9–12] и специальные границы с большой долей узлов совпадения решеток [9–13]. Соответственно, можно предположить, что наличие двух границ, относящихся к специальным, или одной малоугловой и одной специальной в тройном стыке зерен может провоцировать переход к транскристаллитному распространению трещины.

Существенное влияние на возможность распространения трещины КРН по границе зерна оказывает угол между поверхностью границы и направлением растягивающего усилия. Вероятностный анализ удельных работ зернограницного разрушения и транскристаллитного скола приводит к выводу, что смена механизма с межзеренного на транскристаллитный зависит от соотношения удельных работ зернограницного разрушения и транскристаллитного скола, ориентировок границы зерна и плоскости скола относительно направления распространения трещины [14]. Экспериментальное подтверждение зависимости вероятности разрушения границы от угла наклона ее поверхности к плоскости распространения трещины получено для меди [15] и для сплава X-750 [10]. Наиболее редко разрушались границы, имеющие угол с плоскостью трещины около  $90^\circ$ , но, тем не менее, разрушение происходило в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $120^\circ$  относительно направления распространения трещины. Это означает, что пространственное расположение границы также может вносить весомый вклад в переход к транскристаллитному КРН.

Интересным, но до сих пор не исследованным параметром распространения трещин КРН является влияние типа границ зерен на их устойчивость и направление роста трещины. Тип границы определяется в общем случае 5 степенями свободы: тремя параметрами разориентации решеток и двумя параметрами, задающими направление нормали границы. Для описания характера границы удобно использовать углы наклона и вращения решеток зерен на ней [16]. Граница является чистой границей кручения, когда ось разориентации соседних кристаллитов параллельна с нормалью границы, и яв-

ляется чистой границей наклона, когда эти оси перпендикулярны. Во всех остальных случаях тип границы смешанный. Сопротивляемость границы распространению трещин КРН обусловлена энергией границы, которая зависит от углов наклона и кручения решеток [17, 18].

Поскольку граница зерна является дефектом кристаллической решетки, ее растворение происходит быстрее, чем растворение внутренней части зерна. Это явление предполагает возможность замедления роста трещины при переходе от межзеренного к транскристаллитному пути роста.

С увеличением глубины трещины соотношение факторов доступности коррозионной среды и механических напряжений должно смещаться в сторону большего вклада напряжений, что в итоге, на конечной стадии процесса, приводит к разрушению через рост трещины по усталостному механизму или через однократное превышение выдерживаемой нагрузки. Изменение вкладов коррозионного и механического факторов должно также приводить со временем к переходу от межзеренного к транскристаллитному разрушению.

В связи с изложенным целью данной работы было подтверждение транскристаллитного пути роста трещины КРН в околонеutralных средах посредством ориентационного картирования и определение геометрических и кристаллографических условий ранее установленного перехода от межзеренного к транскристаллитному разрушению.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования были выбраны трещины КРН магистрального трубопровода, выполненного из стали 17Г1С-У, имеющей ферритно-перлитную микроструктуру. Состав стали представлен в табл. 1. Трубопровод находился в эксплуатации более 30 лет. Толщина стенки трубы составляла 14.8 мм. На участке с трещинами предел текучести  $\sigma_{0.2}$  составлял 494 Н/мм<sup>2</sup>, предел прочности  $\sigma_g$  – 664 Н/мм<sup>2</sup>. Средний диаметр зерна составлял 12 мкм.

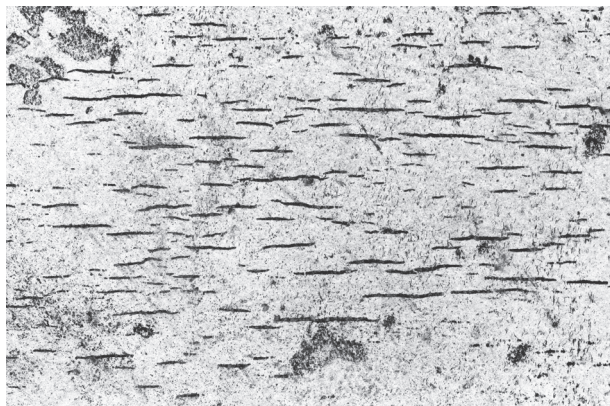


Рис. 1. Общий вид колонии трещин КРН после магнитно-порошковой дефектоскопии.

Трещины были расположены колониями параллельно оси трубопровода. Общий вид колонии трещин КРН после магнитно-порошковой дефектоскопии представлен на рис. 1.

Были подготовлены сечения участка с трещинами, выполненные перпендикулярно плоскости распространения трещин. Образцы были отполированы на шлифовальном станке TegraPol (Struers) с использованием стандартных расходных материалов Struers по следующей методике:

- 2 мин – полотно 120 grit
- 5 мин – алмазная суспензия 9 мкм
- 5 мин – алмазная суспензия 3 мкм
- 8 мин – алмазная суспензия 1 мкм
- 10 мин – коллоидный оксид кремния 50 нм.

Электронная микроскопия была проведена на растровом электронном микроскопе CrossBeam 1540 EsB (Carl Zeiss). Ориентационное картирование проводили при помощи приставки Nordlyss S (Oxford Instruments) и комплекса программного обеспечения HKL Channel 5 (Oxford Instruments). Регистрацию картин ДОЭ проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ с диафрагмой 120 мкм и шагом 100 нм.

Для определения типа границ зерен имеются различные подходы. Так, некоторые авторы предлагают использовать модель с упорядоченными границами для микроструктур с сильно вытянутыми зернами [19]. В другой статье предлагалось использовать пластинки с толщиной, меньшей чем диаметр зерна, для восстановления профиля границы по ее следу на двух сторонах такой пластинки [20]. Нами была проведена адаптация последней методики для существенно меньших зерен. Для анализа типа границ зерен было проведено послойное восстановление трехмерного профиля границ на пути прохождения трещин КРН при

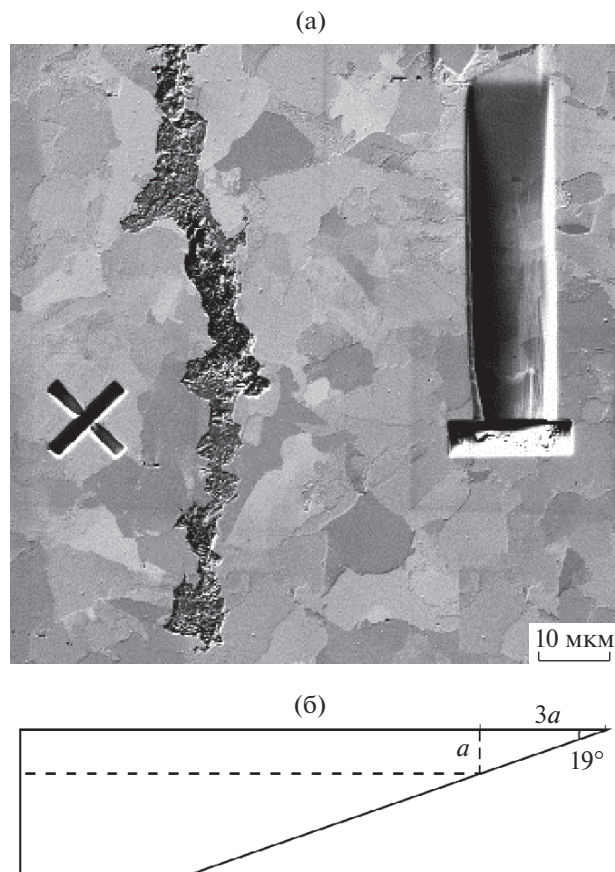


Рис. 2. Канавка и метка возле трещины КРН (а) и схема профиля канавки (б).

помощи шлифовки образцов на контролируемую глубину и последовательного получения карт ДОЭ с каждого шлифа.

Для контроля глубины шлифовки возле трещины при помощи сфокусированного ионного пучка была вытравлена канавка, один торец которой находился под углом в  $19^\circ$  к поверхности шлифа, таким образом, чтобы при шлифовке уменьшение длины канавки равнялось трем уменьшениям ее глубины (рис. 2).

После нанесения канавки с участка сечения, содержащего трещину, была получена карта ДОЭ. Затем образец шлифовался 10 мин с применением только суспензии коллоидного кремния, как описано выше, и с этого же участка снималась еще одна карта ДОЭ. Для обеспечения возможности наложения и выравнивания двух карт ДОЭ, снятых с разной глубины, возле трещин КРН были вытравлены специальные метки.

Из полученных карт были выделены границы зерен и профили трещин, из которых при известной глубине шлифовки были определены геометрическое расположение границы зерна и ориен-

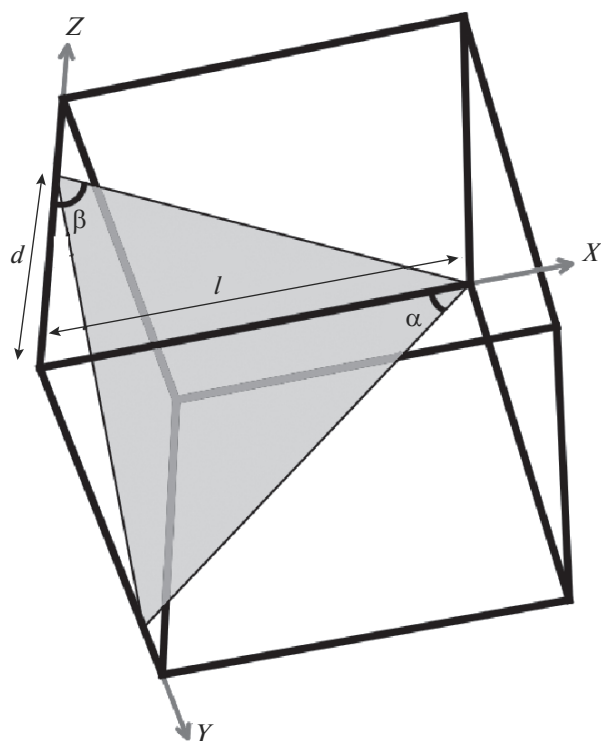


Рис. 3. Схема геометрического описания границы зерна.

тация ее нормали. Для изучения влияния типа границы на распространение трещин были рассчитаны углы наклона и поворота решеток для всех границ, соприкасающихся с трещинами. Для этого на каждой границе определялся угол наклона  $\alpha$  ее следа на карте ДОЭ к оси  $OX$  (рис. 3).

Далее по наложению изображений сеток границ двух шлифов определялся угол наклона  $\beta$  следа границы на плоскости  $OXZ$  к оси  $OZ$  по формуле

$$\beta = \arctan \frac{l}{d},$$

где  $l$  – расстояние между следами границы на двух сечениях,  $d$  – глубина полировки. Затем вычисляли координаты нормали плоскости границы в соответствии с формулами:

$$n_x = 1, \quad n_y = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad n_z = \frac{1}{\operatorname{ctg} \beta}.$$

Для нахождения положения оси разориентации в системе координат образца для каждого зерна была построена матрица ориентации на основании углов Эйлера, получаемых при ориентационном картировании, которые показывают ориентацию кристаллической решетки в данной точке в системе координат образца. Чтобы учесть все эквивалентные вращения, к матрицам ориентации зерен применялись 24 вращения в соответ-

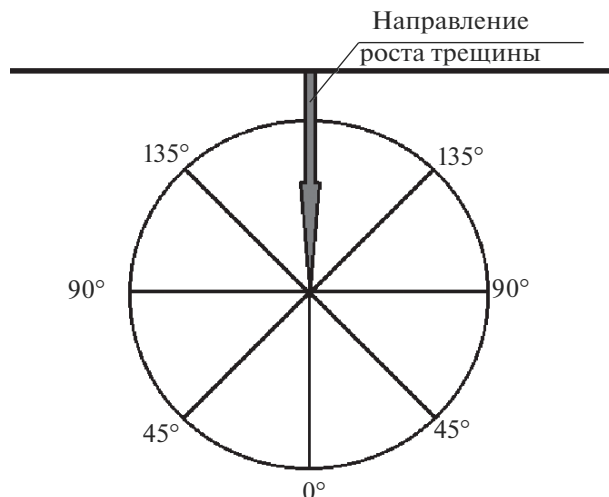


Рис. 4. Схема определения угла между границей и трещиной.

ствии с симметрией решетки ОЦК [21]. Для полученных эквивалентных матриц ориентации были найдены 1096 матриц перехода от зерна к зерну. Из них были отобраны те, для которых угол разориентации был минимален. Затем из матриц разориентации двух зерен были найдены координаты оси поворота в системе координат зерна. Для получения координат оси поворота в координатной системе образца обратная матрица ориентации зерна была умножена на матрицу оси поворота в системе координат зерна:

$$n_s = O_g^{-1} n_c,$$

где  $n_s$  – ось разориентации в системе координат образца,  $O_g$  – матрица ориентации кристалла,  $n_c$  – ось разориентации в системе координат кристаллита.

Из всех возможных, с точки зрения симметрии, вариантов осей разориентации была выбрана та ось, для которой угол кручения решеток, вычисленный в соответствии с [16], был минимален.

Помимо углов наклона и кручения, рассчитывали двугранный угол между границей и трещиной в соответствии со схемой на рис. 4, где стрелкой обозначено направление распространения трещины.

Для определения факторов, влияющих на переход от межзеренного к транскристаллитному росту трещины, был проведен анализ тройных стыков зерен на пути прохождения трещины. При этом учитывались факторы принадлежности границы к специальным границам, угол разориентации и углы наклона и вращения решеток.

Определение характера границ зерен было выполнено для 3 трещин глубиной от 150 до 200 мкм (рис. 5). Глубина шлифовки между слоями составляла 2–3 мкм. Вдоль каждой трещины были исследованы разрушенные и неразрушенные границы от поверхности трубы до острия трещины. Всего было исследовано 170 границ, из которых 72 были разрушены.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании областей сечений, близких к внешней поверхности трубы, было обнаружено множество микротрещин длиной до 10 мкм. В результате их исследования с использованием ориентационных карт было установлено, что они образовались на границах зерен или на границах фаз феррит–цементит в колониях перлита (рис. 6).

Также были обнаружены скопления связанных трещин по границам зерен на поверхности трубы (рис. 7). Глубина таких дефектов тоже не превышала 10 мкм.

Таким образом, механизм зарождения трещин КРН в околонеутральной среде, обычно описываемых как транскристаллитные, является межзеренным. При этом образование не только направленных перпендикулярно оси напряжений трещин, но и сетки разрушенных границ в момент зарождения трещин КРН позволяет предположить, что ввиду меньшей коррозионной стойкости границ зерен по сравнению с объемом зерна преобладающим фактором в зарождении трещин является коррозионное воздействие среды.

При увеличении глубины трещины происходит переход к транскристаллитному росту (рис. 8).

Появление участков транскристаллитного роста может говорить о снижении влияния коррозионного фактора в росте трещины, что может быть следствием снижения доступности коррозионной среды в узком устье трещины около ее вершины. При увеличении глубины трещины нарастание механических напряжений происходит постепенно, поэтому переход от межзеренного к транскристаллитному росту трещины должен быть обусловлен кристаллографическими или геометрическими параметрами зерен или их границ.

Длинные трещины переходят к транскристаллитному пути распространения уже на глубине 30 мкм от поверхности трубы (рис. 8). При этом трещина может переходить обратно к межзеренному разрушению при встрече на ее пути малоустойчивых границ зерен и отклоняться на таких границах от прямолинейного пути распространения, обусловленного приложенными напряжениями. Например, на рис. 9 трещина переходит сначала к

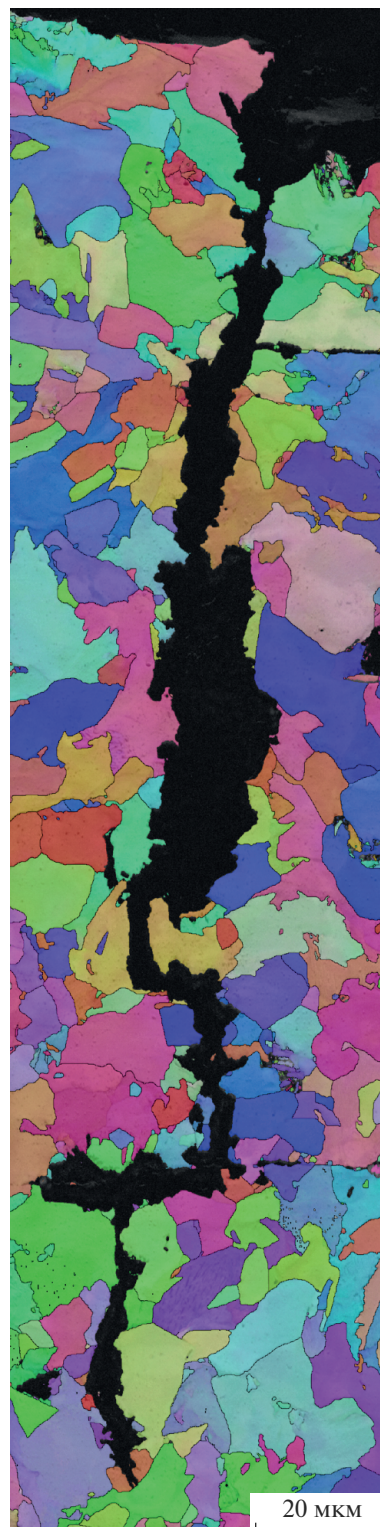
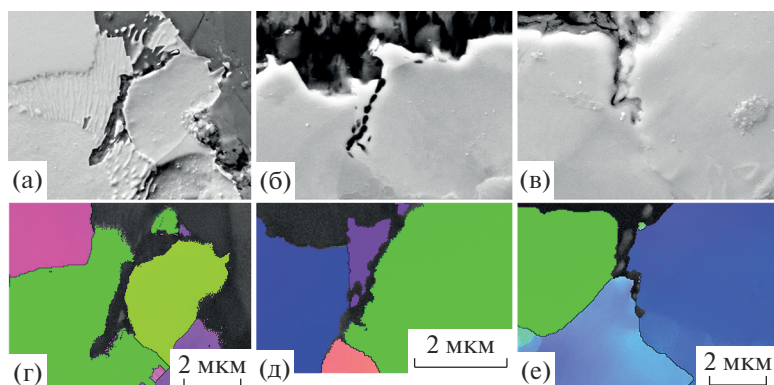


Рис. 5. Одна из трещин КРН, для которых определяли тип границ зерен (вверху внешняя поверхность трубы).

транскристаллитному росту на границе 1, которая является специальной границей  $\Sigma 13a$ , а затем возвращается к межзеренному пути прохождения, выбрав из двух границ ту, которая не является



**Рис. 6.** Электронные микрофотографии (а–в) коротких трещин КРН и ориентационные карты (г–е) в координатах обратных полюсных фигур тех же участков.

специальной, несмотря на то что специальная граница 2 ( $\Sigma 11$ ) расположена под более благоприятным углом к направлению распространения трещины. Дальнейший переход к транскристаллитному росту происходит на стыке границ 3 и 4. При этом граница 4 является специальной ( $\Sigma 15$ ), а граница 3 – чистой границей наклона. Анало-

гичные отклонения от прямолинейного распространения наблюдаются в случае специальных границ 5, 6 и 7.

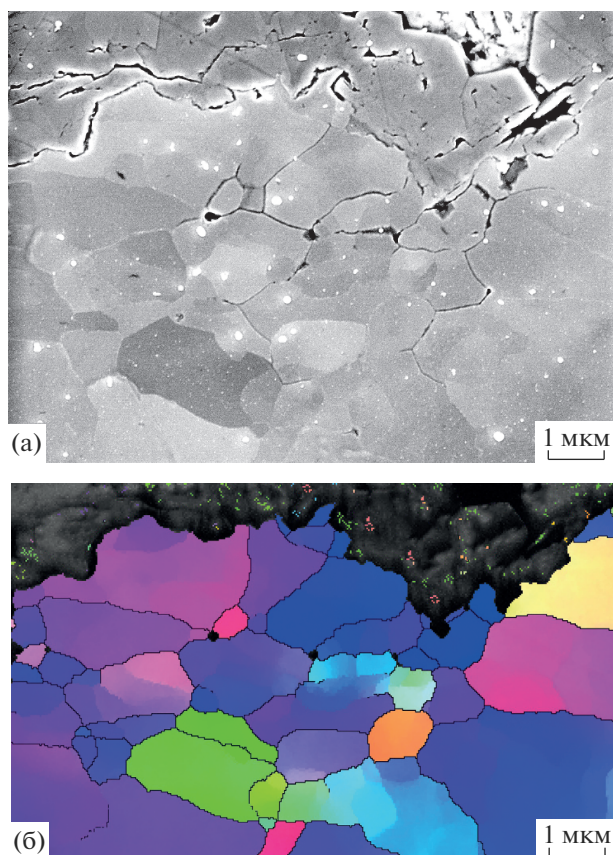
В некоторых случаях переход к транскристаллитному росту может быть обусловлен геометрической конфигурацией неспециальных границ на тройном стыке (рис. 8).

Частотное распределение двугранных углов между границей и трещиной показывает существенные различия между разрушенными и неразрушенными границами. Разрушенные границы преобладают над сохранившимися при углах менее  $30^\circ$ , а неразрушенные преобладают при углах больше  $90^\circ$  (рис. 10).

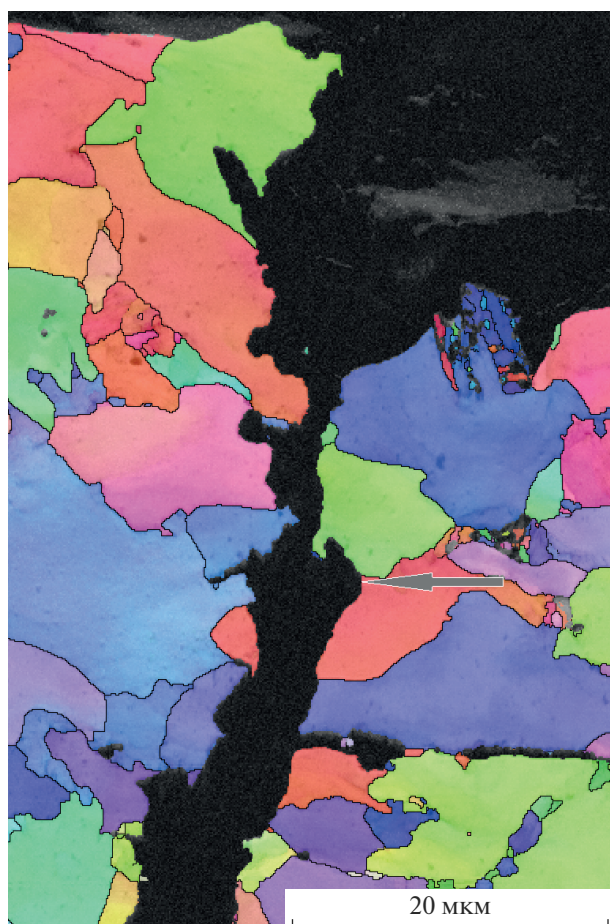
Для угла наклона решеток характерны различия в распределении при углах менее  $30^\circ$ , для которых наблюдается преобладание устойчивых границ. Распределение углов кручения решеток для неразрушенных границ при углах кручения меньше  $2^\circ$  преобладает над распределением для разрушенных, что говорит о большей сопротивляемости КРН границ чистого наклона (рис. 10).

Построение карт специальных границ показало, что границы с большой долей узлов совпадения решеток, встречаясь перед фронтом распространения трещины, часто проявляют устойчивость к КРН и трещина при геометрической необходимости прохождения через такую границу для прямолинейного распространения может отклоняться и изменять свою траекторию (рис. 9). При этом боковое развитие происходит по границе зерна, имеющей подходящую геометрическую ориентацию и не являющейся специальной.

Высокая доступность коррозионной среды на этапе зарождения трещин КРН совместно с пониженной устойчивостью границ зерен к растворению приводит к образованию трещин по межзеренному механизму как в случае щелочной, так



**Рис. 7.** Электронная микрофотография сетки разрушенных границ (а) и ориентационная карта в координатах обратных полюсных фигур этого же участка (б).

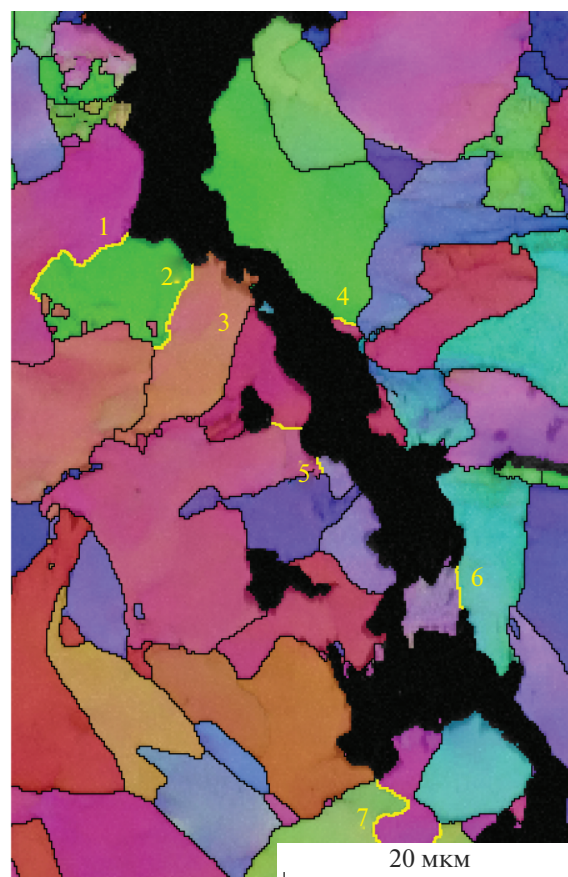


**Рис. 8.** Ориентационная карта трещины КРН (стрелкой указана точка перехода к транскристаллитному росту).

и в случае околонеutralной среды. При этом дальнейшее распространение трещины в случае околонеutralной среды имеет общие черты с хрупким разрушением путем транскристаллитного скола в том смысле, что возникновение межзеренных участков обусловлено геометрическими параметрами, а не энергетическими критериями разрушения [22]. При этом существенное отличие между разрушением сколом и КРН в околонеutralной среде заключается в значительном влиянии специальных границ на протекание процесса и отклонение трещины в последнем случае.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика определения типа границ зерен путем трехмерной реконструкции послойным шлифованием с контролем глубины при помощи калибровочной канавки, которая позволяет получать значения углов вращения и наклона решеток зерен на всей глубине трещины КРН.



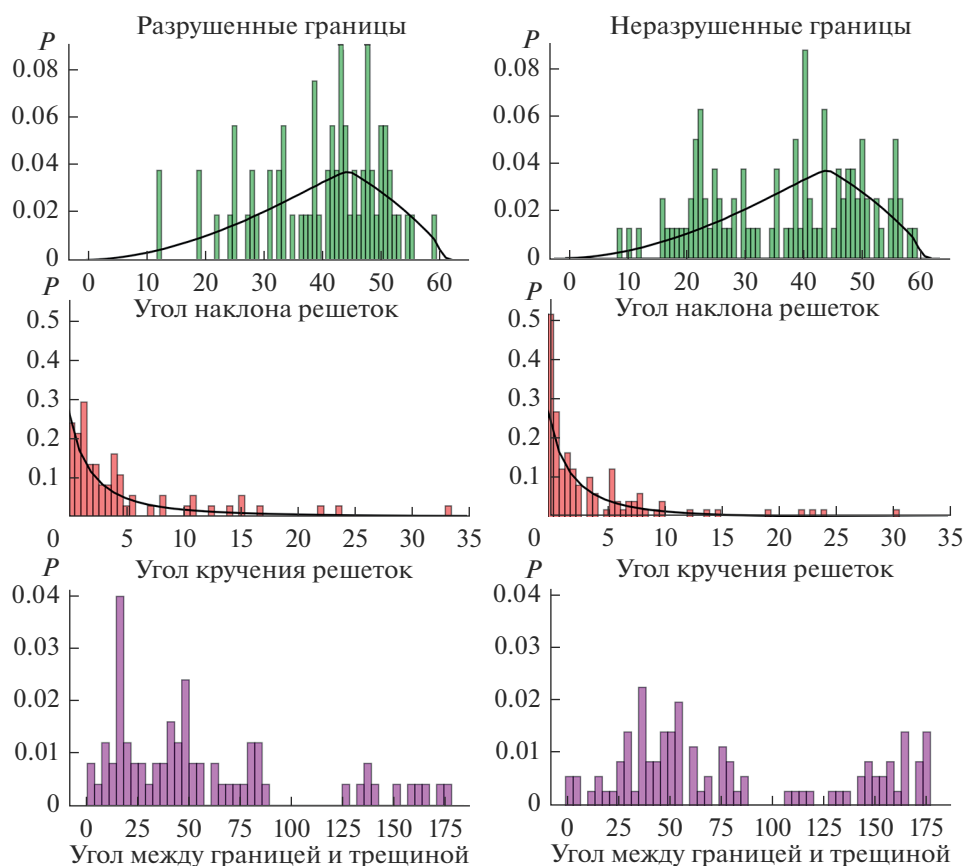
**Рис. 9.** Трещина КРН (специальные границы отмечены желтыми линиями).

КРН в околонеutralной среде сходно с разрушением путем транскристаллитного скола в том, что образование межзеренных участков при распространении трещины обусловлено геометрическими параметрами границ, а не энергетическими критериями.

Трещины КРН, развивающиеся в околонеutralной среде и описываемые в литературе как имеющие транскристаллитный путь распространения, зарождаются на границах зерен и на границах фаз феррит-цементит в колониях перлита. При этом, для зарождения трещин ключевым является фактор наличия коррозионной среды, а не механических напряжений.

Существует переход от межзеренного к транскристаллитному разрушению, обусловленный кристаллографическими или геометрическими параметрами границ зерен.

Стойкость границ зерен к разрушению при КРН в околонеutralной среде в большой степени зависит от пространственного расположения границы зерна относительно плоскости распространения



**Рис. 10.** Распределения углов кручения решеток, наклона решеток и углов между границей и трещиной (черными линиями отмечены случайные распределения соответствующих углов).

трещины. Границы, параллельные этой плоскости, разрушаются чаще остальных.

Тип границы зерна (углы наклона и кручения решеток) и разориентация кристаллитов на границе в меньшей степени влияет на ее устойчивость в условиях КРН в околонейтральной среде. При этом более устойчивыми являются границы с углами наклона меньше  $30^\circ$ , в особенности границы чистого наклона.

Специальные границы с большой долей узлов совпадения решеток устойчивы к разрушению даже при геометрическом расположении, благоприятствующем прохождению по ним трещины.

Переход от межзеренного к транскристаллитному росту трещин КРН происходит в тройных стыках зерен, в которых нет случайно ориентированных границ, благоприятно расположенных относительно плоскости роста трещины.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 007-00129-18-00.

Авторы благодарят профессора НИТУ МИСиС д.ф.-м.н. М.А. Штремеля за детальное обсуждение экспериментальных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Canadian National Energy Board*, Report of the Inquiry Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines. 1996. Calgary. МН-2-95
2. *Fang B.Y., Atrens A., Wang J.Q. et al.* Review of Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels in “Low” and “High” pH Solutions // *J. Mater. Sci.* 2003. V. 38. № 1. P. 127–132. doi 10.1023/A:1021126202539
3. *Антонов В.Г., Арабей А.Б., Воронин В.Н. и др.* Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных трубопроводов: атлас. М.: Наука, 2006. 105 с.
4. *Marchenko L.G., Stolyarov V.I., Lyal'kov A.G. et al.* Production of Tempered Spiral Welded Pipes for Oil and Gas Pipelines // *Сталь.* 2004. № 11. P. 68–73.
5. *Штремель М.А.* Разрушение. Кн. 2. Разрушение структур. М.: МИСиС, 2015. С. 732.
6. *Кантор М.М., Судьин В.В., Боженков В.А.* Применение метода дифракции отраженных электронов для изучения коррозионного растрескивания под



- напряжением магистральных трубопроводов // Вести газовой науки. 2016. № 3 (27). С. 30–36.
7. *Spencer D. T., Edwards M.R., Wenman M.R. et al.* The Initiation and Propagation of Chloride-Induced Transgranular Stress-Corrosion Cracking (TGSCC) of 304L Austenitic Stainless Steel Under Atmospheric Conditions // *Corros. Sci.* 2014. V. 88. P. 76–88. doi 10.1016/j.corsci.2014.07.017
  8. *Chu R., Chen W., Wang S.H. et al.* Microstructure Dependence of Stress Corrosion Cracking Initiation in X-65 Pipeline Steel Exposed to a Near-Neutral pH Soil Environment // *Corrosion.* 2004. V. 60. № 3. P. 275–283. doi 10.5006/1.3287732
  9. *Crawford D.C., Was G.S.* The Role of Grain Boundary Misorientation in Intergranular Cracking of Ni-16Cr-9Fe in 360 C Argon and High-Purity Water // *Metall. Trans. A.* 1992. V. 23. № 4. P. 1195–1206. doi 10.1007/BF02665051
  10. *Pan Y., Adams B. L., Olson T. et al.* Grain-Boundary Structure Effects on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Alloy X-750 // *Acta Mater.* 1996. V. 44. № 12. P. 4685–4695. doi 10.1016/S1359-6454(96)00125-5
  11. *Gertsman V.Y., Bruemmer S.M.* Study of Grain Boundary Character Along Intergranular Stress Corrosion Crack Paths in Austenitic Alloys // *Acta Mater.* 2001. V. 49. № 9. P. 1589–1598. doi 10.1016/S1359-6454(01)00064-7
  12. *Arafin M.A., Szpunar J.A.* A New Understanding of Intergranular Stress Corrosion Cracking Resistance of Pipeline Steel Through Grain Boundary Character and Crystallographic Texture Studies // *Corros. Sci.* 2009. V. 51. № 1. P. 119–128. doi 10.1016/j.corsci.2008.10.006
  13. *Palumbo G., Aust K.T.* Structure-Dependence of Intergranular Corrosion in High Purity Nickel // *Acta Metall. Mater.* 1990. V. 38. № 11. P. 2343–2352. doi 10.1016/0956-7151(90)90101-L
  14. *Штремель М.А.* Конкуренция двух механизмов хрупкого разрушения в поликристалле // *ФММ.* 1982. Т. 53. Вып. 4. С. 807–813.
  15. *Field D.P., Adams B.L.* Interface Cavitation Damage in Polycrystalline Copper // *Acta Metall. Mater.* 1992. V. 40. № 6. P. 1145–1157. doi 10.1016/0956-7151(92)90413-9
  16. *Lange F.F.* Mathematical Characterization of a General Bicrystal // *Acta Metall.* 1967. V. 15. № 2. P. 311–318. doi 10.1016/0001-6160(67)90207-6
  17. *Wolf U., Gumbsch P., Ichinose H. et al.* Incoherent  $\Sigma$  Grain Boundaries in FCC Metals: The Influence of Inclination on The Boundary Structure and Energy // *J. Phys. Colloques.* 1990. V. 51. № C1. P. C1–359–C1–366. doi 10.1051/jphyscol:1990157
  18. *Dunn C.G., Daniels F.W., Bolton M.J.* Relative Energies of Grain Boundaries in Silicon Iron // *J. Metals.* 1950. V. 2. № 10. P. 1245–1248. doi 10.1007/BF03399140
  19. *Zhai T., Wilkinson A.J., Martin J.W.* A Crystallographic Mechanism for Fatigue Crack Propagation Through Grain Boundaries // *Acta Mater.* 2000. V. 48. № 20. P. 4917–4927. doi 10.1016/S1359-6454(00)00214-7
  20. *Seita M., Volpi M., Patala S. et al.* A High-Throughput Technique for Determining Grain Boundary Character Non-Destructively in Microstructures with Through-Thickness Grains // *npj Computat. Mater.* 2016. V. 2. P. 16016. doi 10.1038/npjcompumats.2016.16
  21. *Bollmann W.* *Crystal Defects and Crystalline Interfaces.* N. Y.: Springer, 2012. 254 с.
  22. *Hahn G.T.* The Influence of Microstructure on Brittle Fracture Toughness // *Metall. Mater. Trans. A.* 1984. V. 15. № 6. P. 947–959. doi 10.1007/BF02644685