

## Торможение межзёренного разрушения центробежнолитой стали 40Х25Н20С2 вторичными границами

*Обсуждаются причины формирования трещин в центробежнолитой стали 40Х25Н20С2. Исследованы источники и механизм формирования вторичных границ. Установлена полигонализационная природа этих границ. Показано влияние вторичных границ на торможение межзёренного разрушения отливок.*

**Ключевые слова:** центробежнолитая сталь, межзёренное разрушение, вторичные границы

**В**ведение. Качество центробежнолитых заготовок и труб зависит от условий формирования первичной структуры, в литературе описано влияние способа получения отливок и режимов технологического процесса на характер структурных зон и ликвационные процессы [1]. В то же время, в процессе кристаллизации и охлаждения в стали происходят достаточно сложные явления, связанные с зарождением и перераспределением дефектов кристаллического строения. Изучение этих процессов позволит глубже понять особенности формирования микроструктуры центробежных стальных отливок, выявить причины появления трещин и покажет возможности управлять их механическими характеристиками. Разработка эффективных мер по устранению причин межкристаллитного разрушения центробежнолитых отливок требует всестороннего изучения их природы и механизмов возникновения. Изучению формирования граничной структуры литых металлов и сплавов посвящена работа [2], в которой обсуждаются вопросы влияния первичных и вторичных границ на межкристаллитное разрушение. Практически не исследованы процессы формирования вторичных границ в центробежнолитых сталях. Целью настоящей работы было изучение особенностей формирования вторичных границ в процессе кристаллизации центробежнолитой стали 40Х25Н20С2 и их влияния на торможение межзёренного разрушения.

**Материалы и методики исследований.** Исследована микроструктура трубных заготовок из стали 40Х25Н20С2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Температура заливки расплава составляла 1450, 1550 и 1600 °С. Скорость вращения изложницы – 900, 1200 и 1500 об/мин. При проведении металлографических исследований использовали специальные методы электролитического, химического и теплового травления для выявления зональной и дендритной химической и субструктурной неоднородности. Для качественного и количественного химического микроанализа применяли прибор Самеса MS-46. Особенности образования вторичных зёренных границ в стали 40Х25Н20С2 исследовали в литом состоянии и после отжига при температурах 1100 и 1200 °С с выдержкой один и пять часов. Проводили металлографические

(Неофот-21) и электронномикроскопические исследования JSM-35, «Tesla», ЭМВ-100Б.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Важнейшими технологическими параметрами, оказывающими влияние на структуру и свойства центробежнолитых отливок, являются температура заливки расплава в форму, скорость вращения металлической формы и скорость охлаждения в процессе затвердевания отливок [1]. Проведённые исследования подтвердили влияние технологических параметров на формирование макро- и микроструктуры стали, а также установили зависимость между характером структуры и склонностью отливки к хрупкому межзёренному разрушению. Исследования центробежнолитых заготовок показали, что в тех случаях, когда поверхностная зона замороженных кристаллов отсутствует либо очень тонкая, они обладают повышенной склонностью к хрупкому разрушению. Трещины возникают преимущественно на поверхности или в приповерхностных участках и растут по границам столбчатых кристаллов (рис. 1, а). Микротрещины образуются как с наружной, так и с внутренней поверхности литой трубной заготовки. Наличие грубой транскристаллитной структуры по всему сечению заготовки облегчает межзёренное разрушение. Уменьшение числа оборотов изложницы, понижение температуры заливки и увеличение теплового сопротивления формы путём нанесения теплоизолирующего покрытия типа смеси на внутреннюю поверхность изложницы способствуют увеличению зоны замороженных и равноосных кристаллов, что снижает склонность отливок к межзёренному разрушению.

В отливках обнаружены как горячие трещины кристаллизационного происхождения (рис. 1, а), так и полигонизационные, хотя последние встречались значительно реже. Следует отметить, что первичные границы возникают при срастании ветвей дендритов первого, второго и так далее порядков [2], что сопровождается ограничением роста, изменением механизма роста с дендритного на ячеистый, а также химической микронеоднородностью.

Вторичные границы, согласно [2], имеют различное происхождение. Они могут возникать при миграции первичных границ, появляться при полиморфных превращениях, формироваться вследствие

релаксации напряжений и локальных микросдвигов, возникать вблизи частиц второй фазы, а также иметь полигонизационное происхождение. Последний случай автор работы [2] связывает с перестройкой дефектной структуры литых металлов и сплавов в процессе последующего отжига.

Кристаллизационные трещины возникают в процессе роста дендритов. Внешним признаком этих трещин является характерная рельефная структура их поверхности. Кроме того, наблюдали трещины вблизи неметаллических включений (рис. 1, б), а также в зонах ликвации (рис. 1, в). Появление трещин вблизи неметаллических включений связано с тем, что эти частицы являются концентраторами термических напряжений в стали, величина которых зависит от размера, формы и типа включения [3, 4]. Роль включений в образовании кристаллизационных трещин должна быть предметом специального исследования.

На образование кристаллизационных трещин большое влияние оказывает химическая микронеоднородность, возникающая при кристаллизации отливок (рис. 1, в). Формирование этого дефекта связано с относительным перемещением слоёв расплава различной плотности в центробежном силовом поле с большой интенсивностью [1]. Определяли внутрикристаллическую ликвацию никеля, хрома, кремния, железа в центробежнолитой заготовке 40X25H20C2. Анализ показал, что в центробежнолитых заготовках химическое микронеоднородное распределение выделений карбидной фазы ( $Cr_7C_3$ ) происходит в стыках и междуветвиях дендрита (рис. 2, а). Тепловое травление позволило выявить обедненный хромом аустенит в виде светлых ободков вокруг избыточной фазы (рис. 2, б). Выделение избыточных карбидов в междуветвиях дендритов способствует концентрациям напряжений, что облегчает образование микротрещин.

Отличительными признаками так называемых полигонизационных трещин являются чёткая их локализация по вторичным границам, а также гладкие края их поверхности. Как правило, эти трещины связаны с присутствием вблизи вторичных границ включе-

ний и карбидов. Необходимо рассмотреть причины возникновения вторичных границ при затвердевании и охлаждении центробежнолитой стали. Следует отметить, что формирование вторичных границ может быть связано и не связано с развитием первичных

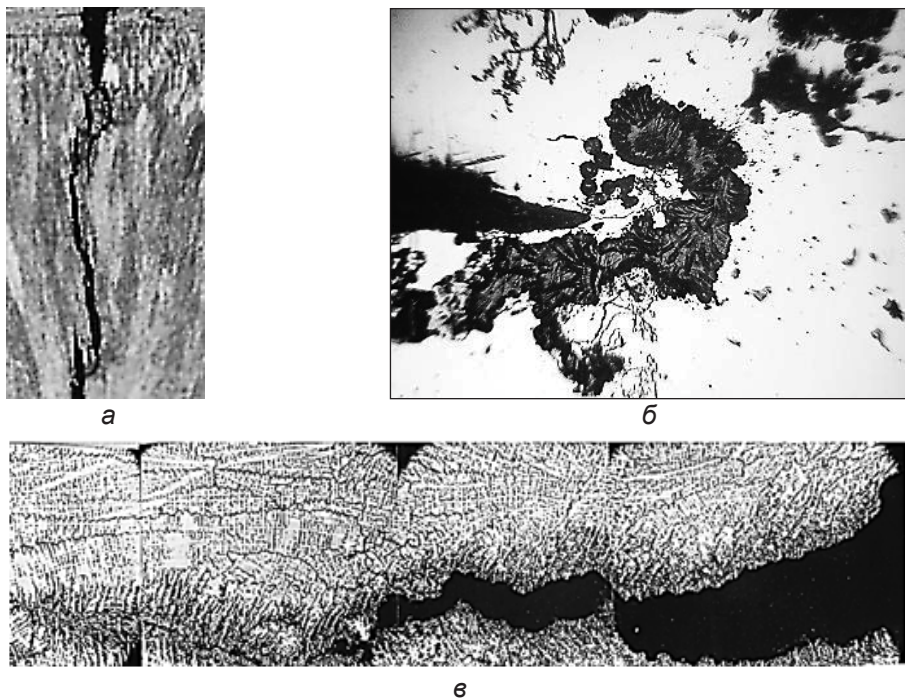


Рис. 1. Трещины кристаллизационного происхождения в центробежнолитых отливках в стали 40X25H20C2; x50 (а, в), x100 (б)

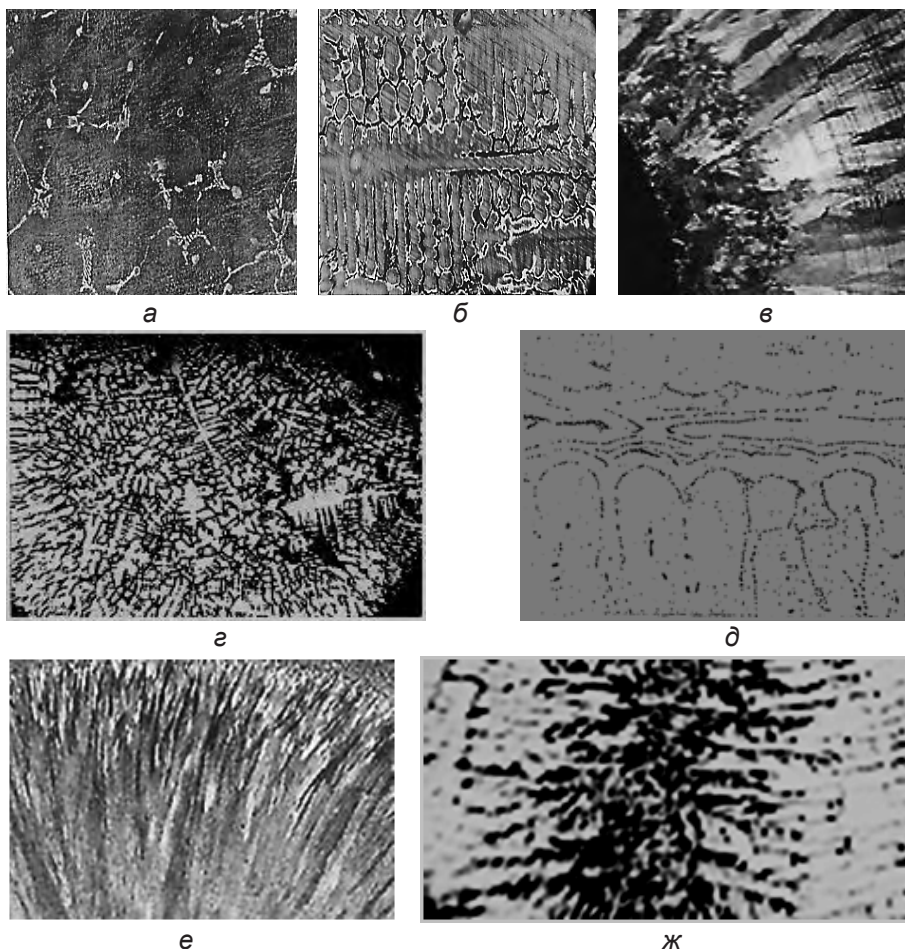


Рис. 2. Структура различных зон кристаллизации стали 40X25H20C2; x50 (а, б), x20 (в, г, е-ж), x100 (д)

границ. Очевидно, основной причиной формирования вторичных границ являются концентрации напряжений различного происхождения, которые возникают в процессе кристаллизации отливки. Эти напряжения могут быть связаны с различными скоростями вращения слоёв расплава [1] и их кристаллизации. Они также возникают в местах перехода от одного затвердевшего слоя к другому (рис. 2, в), где происходит либо торможение роста кристаллов (дендритов) и их отдельных ветвей, либо локальный изгиб ветвей дендритов при их срастании (рис. 2, з).

Вполне очевидно, гидравлические явления, происходящие в расплаве, способствуют локальным турбулентным процессам, о чём свидетельствует специфическое распределение неметаллических включений (рис. 2, д). Это также способствует локальному изгибу дендритов отдельных их ветвей в процессе роста и, как следствие, к возникновению локальных напряжений. Турбулентные потоки обусловлены движением расплава как в тангенциальном, так и в осевом направлении, что в результате образует сложный характер его перемещения относительно формы по винтовой траектории [1, 5]. Возникновение конвекционных и турбулентных потоков в расплаве, определяющих условия роста дендритов, зависит от условий охлаждения. Например, они возникают при охлаждении отливки по внешней и внутренней поверхности (при литье труб) [1]. Наконец, возникновению напряжений способствует наклон столбчатых кристаллов в сторону вращения (рис. 2, е), что связано с влиянием конвекционных потоков, которые отклоняют растущие столбчатые кристаллы (подобно наклону в воде

стеблей водорослей) [1, 6]. Кроме того, наклон столбчатых кристаллов в процессе роста связан не только с относительным движением расплава перед фронтом кристаллизации, но также с преимущественным ростом тех граней, которые обращены навстречу потоку свежего расплава [1].

Следует отметить, что локальный изгиб растущих дендритов (или их ветвей) происходит при высоких температурах, когда они проявляют пластическое поведение, а это способствует зарождению и движению большого количества дислокаций. В местах торможения растущих кристаллов также возникают дислокационные скопления, что порождает субструктурную неоднородность литого металла. Именно это явление вызывает формирование вторичных (полигональных) границ. Образование вторичных границ в стали 40X25H20C2 в процессе кристаллизации и охлаждения связано с накоплением дислокаций в местах концентрации напряжений, их взаимодействием и перераспределением с формированием малоугловых границ. Высокий уровень напряжений на границах ветвей дендритных кристаллов способствует тому, что вблизи первичных зёрненных границ формируются вторичные границы большой протяжённости (рис. 3, а, б), которые часто расположены вдоль дендритных границ и имеют довольно значительную протяжённость.

В местах торможения роста дендритов и их ветвей в зонах контакта различных зон кристаллизации, а также при наклоне столбчатых кристаллов возникают специфические субструктурные вихревые микроразнообразия с повышенной плотностью дислокаций, которые в процессе взаимодействия и перераспределения

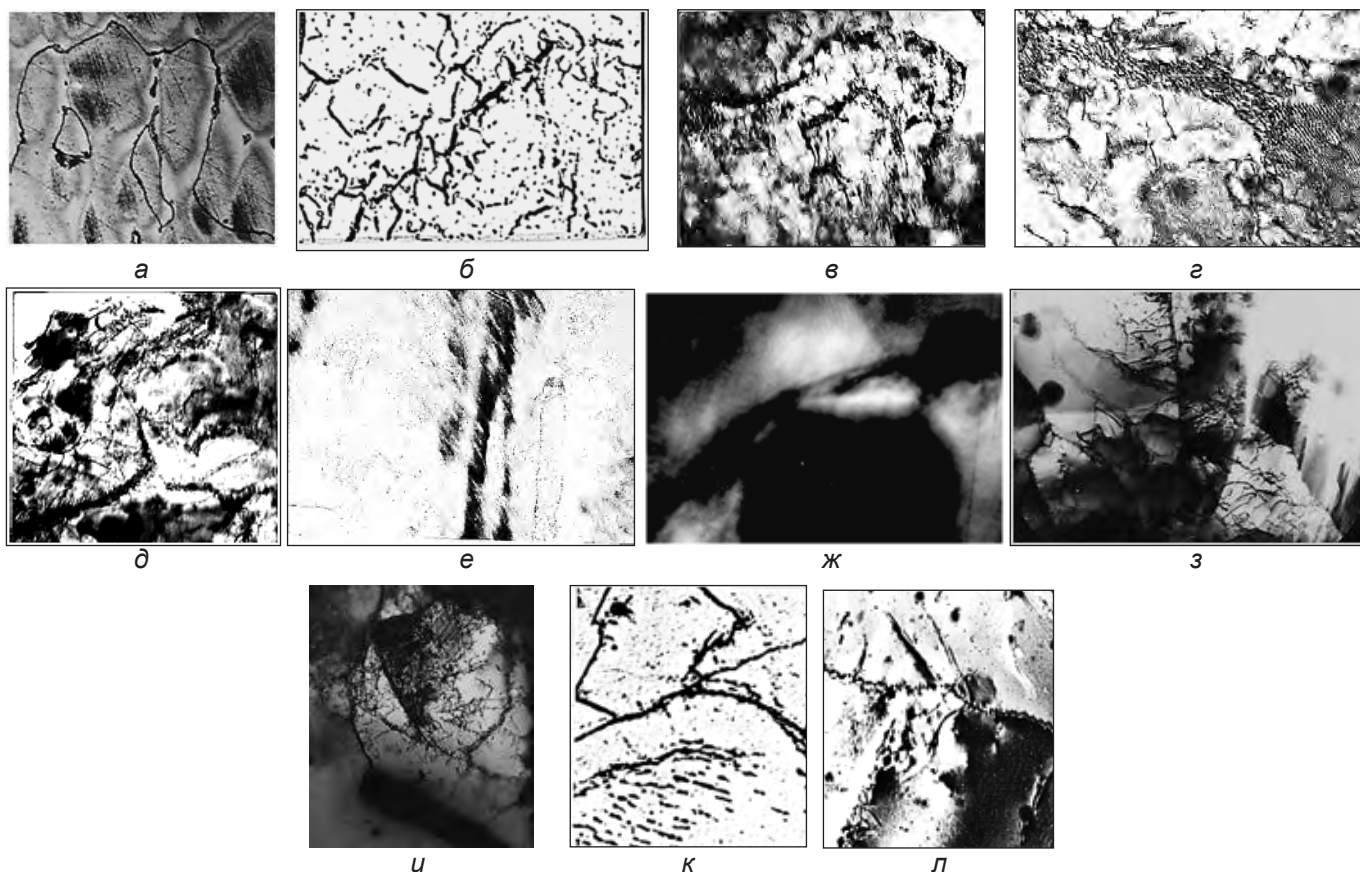


Рис. 3. Образование вторичных зёрненных границ в литой и отожжённой стали 40X25H20C2; x150 (а), x2000 (б, в, г, д), x20000 (е-д, ж-и, л)

формируют изогнутые либо закрученные вторичные субграницы (рис. 3, в-д). Такие вторичные границы не имеют большой протяжённости и локализованы в зонах субструктурной турбулентности.

Химическая неоднородность играет важную роль при формировании вторичной зёрненной структуры (см. рис. 2, ж). Речь идёт не только о зональной ликвации, которая способствует образованию в отливке зон с локальным изменением параметра кристаллической решётки [2, 7], вызванным неравномерным распределением легирующих элементов, релаксация которых происходит путём образования стенок из краевых дислокаций. В ликвационных зонах возникают градиенты концентрации напряжений, что вызывает перераспределение вакансий и дислокаций. Все эти процессы способствуют появлению зон с повышенным и неоднородным распределением дислокаций. Образовавшиеся вблизи границ ветвей дендритных кристаллов дислокационные стенки (субграницы) могут либо замыкаться, либо объединяться, формируя вторичные границы большой протяжённости. Происходит также фракционирование примесей на этих вторичных границах (рис. 3, е) [7, 8], что способствует их стабилизации.

Ещё одним источником формирования вторичных границ являются неметаллические включения. Известно, что различие физических, механических и химических свойств включения и матрицы стали приводит к возникновению напряжений на границе их раздела [3, 4]. При отсутствии деформирующего внешнего воздействия в стали возникают остаточные напряжения, обусловленные присутствием включений. Эти напряжения вызываются межфазными напряжениями на границах раздела включение-матрица, фазовым наклёпом, обусловленным превращениями в стали и частицах при изменении температуры, концентрацией дефектов кристаллического строения. Вблизи поверхности частицы они имеют величину порядка  $G_M/100$ , где  $G_M$  – модуль сдвига матрицы [3, 4]. Напряжения, которые возникают вблизи неметаллических включений в процессе кристаллизации и охлаждения стали при центробежном литье имеют термическую природу. Многочисленные расчёты показали, что величина термических напряжений вблизи включений превышает предел текучести стали [3, 4], поэтому должна развиваться пластическая их релаксация в зонах матрицы, прилегающих к включениям, что способствует уменьшению напряжений. Вокруг включений создаются «пластические» зоны с повышенной плотностью дислокаций. В процессе охлаждения стали термические напряжения непрерывно возрастают до определённого уровня (критического значения, равного пределу текучести матрицы), а затем релаксируют путём пластических сдвигов или ротаций в области, прилегающей к включению. Релаксация идёт непосредственно от межфазной границы включение-матрица, которая может выступать в качестве источника дислокаций [3, 4], или на некотором расстоянии от неё. При этом происходит взаимодействие дислокаций и их перестройка с образованием новых вторичных малоугловых и среднеугловых границ (рис. 3, ж). Поскольку появле-

ние термических напряжений связано с охлаждением стали от довольно высокой температуры, в релаксационных процессах большую роль играют точечные дефекты, имеющиеся на межфазных границах включение-матрица [3, 4]. Повышенное количество вакансий способствует переползанию дислокаций, что облегчает полигонизационные процессы вблизи включений.

Таким образом, формирование вторичных границ в процессе кристаллизации и охлаждения изучаемой стали связано с возникновением концентраторов напряжений и зон с повышенной плотностью дислокаций, а также с их релаксацией по полигонизационному механизму в местах торможения роста дендритов и их ветвей, локального изгиба ветвей дендритов, в зонах химической неоднородности и вблизи неметаллических включений. Торможение роста дендритов и их ветвей обусловлено различной скоростью вращения различных слоёв расплава и, как следствие, различной скоростью их кристаллизации, а также переходом от одного затвердевшего слоя к другому при изменении условий затвердевания. Кроме того, концентрации напряжений возникают при локальном изгибе ветвей дендритов в процессе их срастания, наклоне столбчатых кристаллов в сторону вращения под влиянием конвекционных потоков, а также с преимущественным ростом тех граней, которые обращены навстречу потоку свежего расплава. При этом растущие кристаллы в условиях высоких температур проявляют пластическое поведение, происходит генерирование, движение и взаимодействие дислокаций, также возникают зоны субструктурной турбулентности. В участках химической неоднородности происходит локальное изменение параметра кристаллической решётки, а также фракционирование примесей, что способствует концентрациям напряжений. Сталь, полученная методом центробежного литья, обладает значительной неоднородностью распределения напряжений. Все эти сложные процессы способствуют формированию субструктурной неоднородности и возникновению вторичных границ полигонизационного происхождения. Следует отметить, что формирование вторичных границ в результате миграции первичных границ в изучаемой аустенитной стали также может иметь место [2], в то же время исключено их образование в результате полиморфного превращения.

При последующем отжиге происходит перестройка дислокационной субструктуры, которая сформировалась в процессе кристаллизации и охлаждения. В сформированных вторичных границах, а также вблизи неметаллических включений происходят процессы переползания и поперечного скольжения дислокаций, в то же время формируются новые вторичные границы как в результате образования и укрупнения субзёрен, так и путём перераспределения дислокаций с образованием границ в участках с повышенной плотностью дислокаций (рис. 3, з, и). Ещё один механизм образования вторичных границ в процессе отжига связан с испусканием дендритными границами решёточных дислокаций. Очевидно, в процессе кристаллизации в дендритных (первичных)

границах вследствие возникновения напряжений накопилось повышенное количество граничных дефектов, в частности зернограничных дислокаций [9-11], перераспределение которых в пределах этих границ в процессе отжига способствует снижению напряжений, что сопровождается испусканием в зерна ансамблей решёточных дислокаций (рис. 3, к). Аналогичные процессы наблюдали при отжиге вблизи межфазных границ включение-матрица стали [3, 4]. Происходит взаимодействие этих решёточных дислокаций, что приводит к формированию дислокационных вторичных границ.

Отжиг литых заготовок приводит не только к ослаблению дендритной ликвации, но и к перераспределению легирующих элементов в связи с частичным растворением карбидов. В то же время на имеющихся полигональных субграницах, где проходило фракционирование примесей вследствие так называемой «вторичной» химической микронеоднородности [2], возникают дисперсные выделения, которые способствуют стабилизации этих субграниц (рис. 3, л). После отжига при 1100 °С (1 ч) ободки обеднённого хромом аустенита не обнаружены. Повышение температуры отжига до 1200 °С приводит к дальнейшему ослаблению дендритной ликвации и уменьшению количества карбидной фазы.

При высокотемпературном отжиге процессы полигонизации и рекристаллизации протекают крайне неравномерно, что связано с наследованием неоднородности субструктуры, сформированной в процессе кристаллизации. Поэтому увеличение отжига до 5 часов не приводит к полному завершению процессов разупрочнения. При этом полностью не устраняется химическая микронеоднородность зёрен аустенита. Для её устранения, как и для снижения субструктурной микронеоднородности, требуются более продолжительные выдержки при отжиге.

Полученные результаты подтверждают полигонизационную природу вторичных зёренных границ, которые возникают в локальных участках высокой плотности дефектов. Высокая и неравномерная плотность дислокаций в отливках из стали 40X25H20C2 определяет сложный характер изменений дислокационной структуры в процессе полигонизации и рекристаллизации при высокотемпературном отжиге.

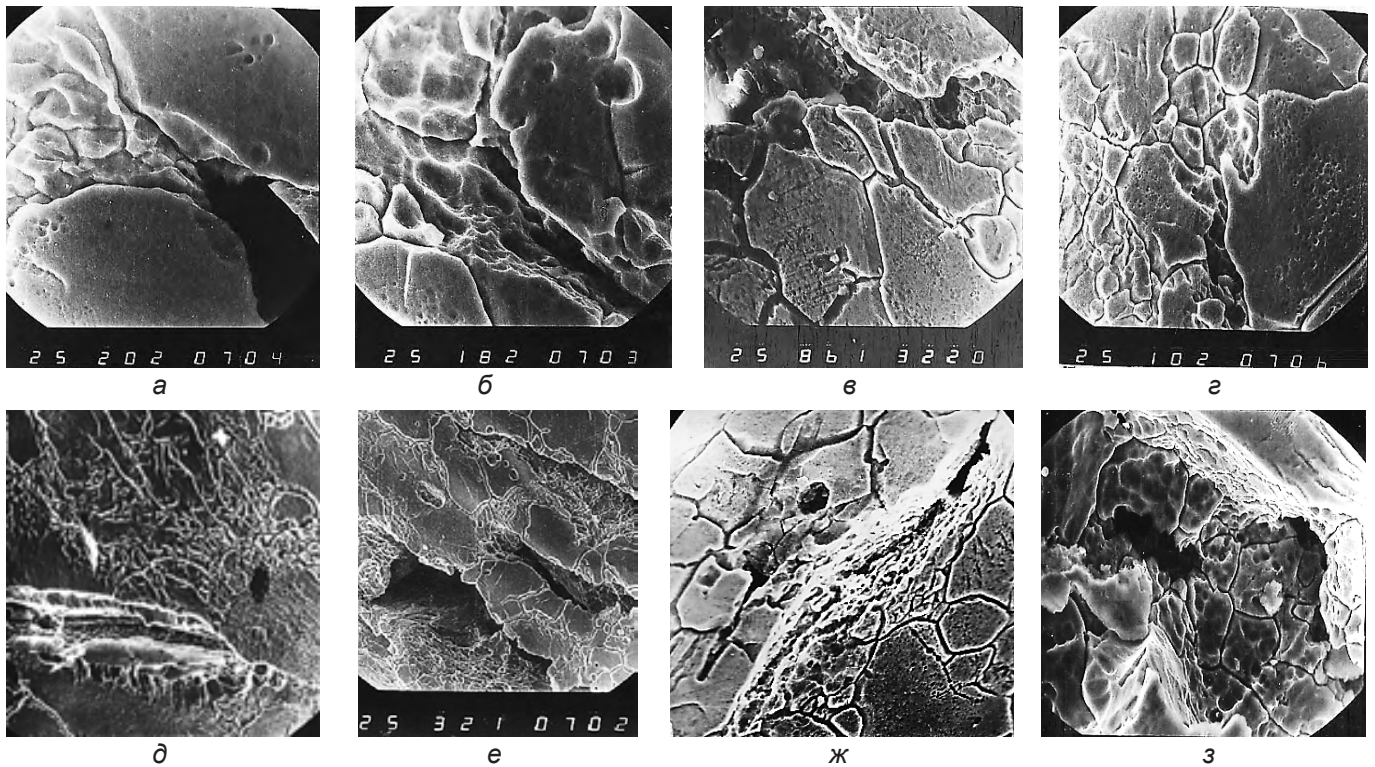
Таким образом, вторичные границы формируются в процессе кристаллизации и охлаждения, а также отжига центробежнолитой стали 40X25H20C2 в результате перераспределения дислокаций по полигонизационному механизму. В то же время отличаются условия протекания обсуждаемых процессов, что вносит некоторые различия. При кристаллизации и охлаждении концентраторы напряжений возникают и релаксируют непрерывно при постоянно изменяющейся температуре, что способствует формированию неоднородной субструктуры и протеканию полигонизационных процессов в результате упорядоченного перераспределения дислокаций при постоянно изменяющейся их плотности вблизи различных источников концентрации напряжений. Уменьшение числа оборотов изложницы, понижение температуры заливки и увеличение теплового сопротивления

формы путём нанесения теплоизолирующего покрытия типа смеси на внутреннюю поверхность изложницы способствуют снижению скорости охлаждения, что создаёт временные условия для релаксации напряжений путём упорядоченного перераспределения дислокаций и формирования вторичных полигональных границ, что способствует получению развитой неоднородной субструктуры центробежнолитой стали. При отжиге процессы полигонизационной перестройки дислокационной субструктуры, сформированной в литой стали, продолжают в условиях постоянной температуры и сопровождаются снижением уровня ликвации и выделением дисперсных фаз на новых вторичных границах.

Рассмотрим влияние вторичных границ на распространение межзёренных трещин в центробежнолитой стали 40X25H20C2. В работе [2] показана негативная роль вторичных границ в развитии межкристаллического разрушения сварных соединений, однако условия кристаллизации в этих случаях существенно отличались от таковых при центробежном литье. В то же время известны многочисленные работы, в которых показано, что полигональные структуры могут затруднять межзёренное разрушение, действуя по принципу локального субструктурного упрочнения. Редкие случаи возникновения трещин вдоль вторичных границ связаны с присутствием карбидов и неметаллических включений. Очевидно, формирование вторичных границ следует рассматривать как фактор упрочнения и повышения уровня механических характеристик центробежнолитых сталей. Поэтому необходимо в процессе кристаллизации центробежнолитых сталей создавать условия для протекания полигонизационных процессов в местах концентрации напряжений с целью формирования развитой полигональной субструктуры, как это стремятся достичь при пластической деформации.

Рассмотрим влияние вторичных границ на зарождение и развитие трещин в центробежнолитой стали 40X25H20C2. Как правило, кристаллизационные трещины распространяются по границам столбчатых кристаллов (дендритов) на довольно большие расстояния, что способствует отбраковке отливок. Эти трещины окружены зонами формирования вторичных границ. Исследование развития кристаллизационных трещин в изучаемых отливках показало, что при встрече с участками, имеющими развитую субструктуру вторичных полигональных границ, происходит их торможение. Зоны субструктурной неоднородности и турбулентности способствуют разветвлению (рис. 4, а-в), торможению и блокировке развития кристаллизационных трещин вторичными границами (рис. 4, г-е). Разветвление кристаллизационной трещины происходит на нескольких мелких трещинах, которые продолжают вдоль вторичных полигональных границ и в них же останавливаются в своём развитии. При этом очевидно происходит рассеивание энергии, которая имеется в устье кристаллизационной трещины, на энергии нескольких микротрещин.

По-видимому, напрашиваются некоторые аналогии по влиянию измельчения зёрен на развитие



**Рис. 4.** Торможение развития кристаллизационных трещин

межзёрненных трещин. Происходит задержка межзёрненного разрушения, в устье заторможенной кристаллизационной трещины возникают волны напряжений, сброс которых порождает микродеформацию как вблизи устья трещины, так и в зонах с вторичными полигональными границами (рис. 4, ж, з). При этом взаимодействуют поля напряжений соседних концентраторов напряжений – вторичных границ, что приводит к появлению новых дефектов кристаллического строения (дислокаций). На вторичных границах межповерхностные (контактные) напряжения носят осциллирующий характер [3], определяющий дискретность скольжения вблизи этих полигональных границ как концентраторов напряжений, а также появление источников дислокаций, связанных с градиентами напряжений. Движение дислокаций в зонах пластической релаксации напряжений может сопровождаться генерацией точечных дефектов, поэтому следует учитывать вклад от дрейфа неравновесных вакансий в изучаемые процессы.

Эти процессы способствуют формированию локальной субструктуры уже вблизи вторичных полигональных границ (как бы субструктура второго порядка), что дополнительно препятствует росту микротрещин. Кроме того, возможны перестройки структуры самих полигональных границ в результате перераспределения зернограницных дислокаций [8-11, 13], что может вызвать трансформацию вторичных границ в большеугловые специальные границы с определённой структурой. Следует учитывать и возможный локальный разогрев металла в устье кристаллизационной трещины [14], который оказывает влияние на снижение напряжений и характер релаксационных процессов.

Очевидно, при анализе характера распространения трещин вдоль первичных границ дендритов

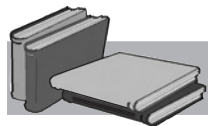
и вторичных полигональных границ следует учитывать и особенности строения этих границ, определяемые условиями их образования. Первичные границы столбчатых дендритов относятся к границам общего типа [2, 8-11], которые содержат множество граничных дефектов, участки «плохого» совпадения решёток соседних дендритов, примеси, микронесплошности и так далее, что ослабляет эти границы и способствует развитию межзёрненных трещин в литых сталях. Вторичные полигональные либо специальные границы имеют дислокационное строение, для которого характерно упорядоченное расположение граничных дефектов, наличие участков «хорошего» совпадения соседних субзёрен или зёрен [8-11, 13], что способствует упрочнению этих границ. Кроме того, в отличие от практически прямых первичных границ столбчатых кристаллов, вторичные границы представляют собой разветвлённую сеть с изгибами и поворотами, что затрудняет распространение межзёрненных трещин.

## Выводы

Формирование вторичных границ в процессе кристаллизации и охлаждения центробежнолитой стали связано с возникновением концентраторов напряжений и зон с повышенной плотностью дислокаций, а также с их релаксацией по полигонизационному механизму в местах торможения роста дендритов и их ветвей, локального изгиба ветвей дендритов, в зонах химической неоднородности и вблизи неметаллических включений. При отжиге происходит перестройка дислокационной субструктуры, которая сформировалась в процессе кристаллизации и охлаждения, что приводит к формированию новых вторичных границ. Формирование вторичных границ следует

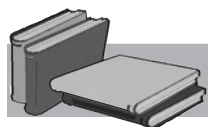
рассматривать как фактор упрочнения и повышения уровня механических характеристик центробежно-

тых сталей, а также торможения развития кристаллизационных трещин.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин С. Б. Центробежное литьё / С. Б. Юдин, М. М. Левин, С. Е. Розенфельд – М.: Машиностроение, 1972. – 415 с.
2. Мовчан Б. А. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах / Б. А. Мовчан. – К.: Техника, 1970. – 212 с.
3. Губенко С. И. Неметаллические включения в сталях. / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
4. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в сталях / С. И. Губенко. – М.: Metallurgia, 1991. – 225 с.
5. Идельчик И. Е. Гидравлическое сопротивление / И. Е. Идельчик. – Л.: Госэнергоизда, 1954. – 221 с.
6. Саротовкин Д. Д. Дендритная кристаллизация / Д. Д. Саротовкин – М.: Metallurgizdat, 1953. – 176 с.
7. Голиков И. Н. Дендритная ликвация в сталях и сплавах / И. Н. Голиков, С. Б. Масленков. – М.: Metallurgia, 1977. – 224 с.
8. Грабский М. В. Структура границ зёрен в металлах / М. В. Грабский. – М.: Metallurgia, 1972. – 160 с.
9. Бокштейн Б. С. Термодинамика и кинетика границ зёрен в металлах / Б. С. Бокштейн, И. В. Копецкий, Л. С. Швиндлерман – М.: Metallurgia, 1986. – 224 с.
10. Структура межкристаллитных и межфазных границ / В. М. Косевич, В. М. Иевлев, Л. С. Палатник, А. И. Федоренко. – М.: Metallurgia, 1980. – 256 с.
11. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах / Б. С. Бокштейн, И. В. Копецкий, Л. С. Швиндлерман и др. – М.: Наука, 1988. – 272 с.
12. Финкель В. М. Физика разрушения / В. М. Финкель. – М.: Metallurgia, 1970. – 376 с.
13. Кайбышев О. А. Границы зёрен и свойства металлов / О. А. Кайбышев, Р. З. Валиев. – М.: Metallurgia, 1987. – 214 с.
14. Райс Дж. Р. Локальный нагрев за счёт пластической деформации у вершины трещины. В кн. Физика прочности и пластичности / Райс Дж. Р., Н. Леви. – М.: Metallurgia, 1972. – 304 с. – С. 241 – 258.



## REFERENCES

1. Yudin S. B., Levin M. M., Rozenfel'd S. E. (1972) *Centrobezhnoe lit'e [Centrifugal casting]* M.: ashynostroenie, pp. 415. [in Russian].
2. Movchan B. A. (1970). *Granicy kristallitov v lityh metallah i splavah. [The boundaries of the crystallites in cast metals and alloys]*. K.: Tehnika, 212. [in Russian].
3. Gubenko S. I., Parusov V. V., Derevianchenko I. V. (2005). *Nemetallicheskie vključenja v stali. [Non-metallic inclusions in steel]*. Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 536. [in Russian].
4. Gubenko S. I. (1991). *Transformaciia nemetallicheskih vkluchenii v stali. [Transformation of nonmetallic inclusions in steel]*. – M.: Metallurgija, pp. 225 [in Russian].
5. Idel'chik I. E. (1954). *Gidravlichesкое soprotivlenie. [Pressure drop]*. – L.: Gosenergoizdat, pp. 221. [in Russian].
6. Sarotovkin D. D. (1953). *Dendritnaya kristallizaciya. [Dendritic crystallization]*. – M.: Metallurgizdat, pp. 176. [in Russian].
7. Golikov I. N., Maslenkov S. B. (1977). *Dendritnaya likvaciya v staliah i splavah. [Dendritic segregation in steels and alloys]*. – M.: Metallurgiya, pp. 224. [in Russian].
8. Grabskij M. V. (1972). *Struktura granic zeren v metallah. [The structure of grain boundaries in metals]*. – M.: Metallurgiya, pp. 160. [in Russian].
9. Bokshtejn B. S., Kopeckij I. V., Shvindlerman L. S. (1986). *Termodinamika i kinetika granic zeren v metallah. [The thermodynamics and kinetics of grain boundaries in metals]*. – M.: Metallurgija, pp. 224. [in Russian].
10. Kosevich V. M., Ievlev V. M., Palatnik L. S. et al (1980). *Struktura mezhkristallitnyh i mezhfaznyh granic. [The structure of intergranular and interphase boundaries]*. – M.: Metallurgiya, pp. 256. [in Russian].
11. Bokshtejn B.S., Kopeckij I.V., Shvindlerman L.S. et al (1988). *Struktura i svojstva vnutrennih poverhnostey razdela v metallah [The structure and properties of the internal interfaces of metals]*. – M.: Nauka, pp. 272. [in Russian].
12. Finkel' V. M. (1970). *Fizika razrusheniia. [destruction Physics]*. – M.: Metallurgija, pp. 376. [in Russian].
13. Kajbyshev O. A., Valiev R. Z. (1987). *Granicy zeren i svojstva metallov. [The grain boundaries and properties of metals]*. – M.: Metallurgija, pp. 214. [in Russian].
14. Rajs Dzh. R., Леви Н. (1972). *Lokal'nyy nagrev za schet plasticheskoy deformacii u vershiny treshchiny. V kn. Fizika prochnosti i plastichnosti [The local heating by plastic deformation at the crack tip]*. – M.: Metallurgija, pp. 241-258. [in Russian].

## Анотація

Губенко С. І., Балєва Ю. І.

Гальмування міжзеренного руйнування відцентровою сталі 40X25H20C2 вторинними границями

Обговорюються причини формування тріщин у відцентроволитій сталі 40X25H20C2. Досліджено джерела і механізм формування вторинних границь. Встановлено полігонізаційну природу цих границь. Показано вплив вторинних границь на гальмування міжзеренного руйнування відливок.

## Ключові слова

відцентровою сталь, міжзеренне руйнування, вторинні границі

## Summary

Gubenko S., Baleva J.

Retarding of intergranular fracture of centrifugal casting steel 40Cr25Ni20Si2 by secondary boundaries

The causes of cracks formation in centrifugal casting steel 40Cr25Ni20Si2 are discussed. The sources and mechanism of secondary boundaries formation were investigated. The polygonization nature of these boundaries was mounted. It was shown the influence of secondary boundaries on retarding of intergranular fracture of casts.

## Keywords

centrifugal casting steel, intergranular fracture, secondary boundaries

Поступила 17.02.2016

Ежемесячный научно-технологический журнал

**«Металл и литьё Украины»**

предлагает разместить на своих страницах рекламу:

**новых технологий, оборудования и изделий, методик и материалов,**

**предлагаемых товаров и услуг,**

**информацию об обучении, выставках, конференциях**

**и другую полезную информацию.**