

УДК 621.74.042:669.017

DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.25.101

ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ГРАНИЦ В ЛИТОЙ СТАЛИГУБЕНКО С. И., *д. т. н, проф.*Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sigubenko@email.dp.ua

Аннотация. Цель работы – изучение особенностей формирования вторичных границ в процессе кристаллизации центробежно-литой стали 40X25H20C. **Методика.** Исследована микроструктура трубных заготовок из стали 40X25H20C2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Особенности образования вторичных зеренных границ в стали 40X25H20C2 исследовали в литом состоянии и после отжига при температурах 1 100 и 1 200 °С с выдержкой один и пять час. Проводили металлографические «Неофот–21» и электронномикроскопические исследования JSM–35, «Tesla», ЭМВ–100Б. **Результаты.** Изменения технологических параметров центробежного литья, приводящие к уменьшению зоны трансформации и увеличению поверхностных зон равноосных кристаллов в структуре, позволяют ослабить склонность к хрупкому межкристаллитному разрушению. В исследуемых отливках возникают горячие трещины кристаллизационного происхождения, а также полигонизационные трещины. Показано, что на образование кристаллизационных трещин существенное влияние оказывает химическая неоднородность, а на образование полигонизационных трещин – субструктурная неоднородность, обуславливаемая формированием вторичных границ. **Научная новизна.** Обсуждаются основные источники образования вторичных границ в центробежнолитой стали по полигонизационному механизму. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют использовать вторичные границы для торможения развития межзеренных трещин.

Ключевые слова: центробежное литье; трещины; зеренная и полигонизационная структура; вторичные границы

ФОРМУВАННЯ ВТОРИННИХ ГРАНИЦЬ У ЛИТІЙ СТАЛІГУБЕНКО С. І., *д. т. н, проф.*Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sigubenko@email.dp.ua

Анотація. Мета роботи – вивчення особливостей формування вторинних границь у процесі кристалізації відцентрової сталі 40X25H20C. **Методика.** Досліджено микроструктуру трубних заготовок із сталі 40X25H20C2, отриманих на горизонтальних машинах відцентрового лиття. Особливості утворення вторинних зерен границь у сталі 40X25H20C2 досліджували в литому стані і після відпалу за температур 1 100 і 1 200 °С з витримкою одну і п'ять годин. Проводили металографічні «Неофот–21» та електронномікроскопічні дослідження JSM–35, «Tesla», ЕМВ–100Б. **Результати.** Зміни технологічних параметрів відцентрового лиття, що викликають зменшення зони трансформации та збільшення поверхневих зон рівновісних кристалів у структурі, дозволяють послабити схильність до крихкого міжкристалітного руйнування. У досліджуваних відливках виникають гарячі тріщини кристалітного походження, а також полігонізаційні тріщини. Показано, що на утворення кристалізаційних тріщин істотно впливає хімічна неоднорідність, а на утворення полігонізаційних тріщин – субструктурна неоднорідність, що зумовлюється формуванням вторинних границь. **Наукова новизна.** Обговорюються основні джерела утворення вторинних границь у відцентрової сталі за полігонізаційним механізмом. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють використовувати вторинні границі для гальмування розвитку міжзеренних тріщин.

Ключові слова: відцентрове лиття; тріщини; зерна і полігонізаційна структура; вторинні границі

FORMATION OF SECONDARY BOUNDARIES IN CAST STEELGUBENKO S.I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina av., 4, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sigubenko@email.dp.ua

Abstract. Purpose. Study of the formation of secondary grain boundaries during crystallization in centrifugally-cast billets (steel grade 40X25H20C2). **Methodology.** The microstructure of hollow billets (steel grade 40X25H20C2) produced by horizontal centrifugal casting machines was analyzed. Features of secondary grain boundaries in 40X25H20C2 steel were examined in the cast state after annealing at temperatures of 1 100°C and 1 200 °C and equalizing for one and five hours. Metallographic “Neophot–21” and electron microscopies JSM–35, «Tesla», EMW–100B studies were conducted. **Findings.** It was found that changes in

technological parameters of centrifugal casting leading to a reduction of the transcrystallization area and increased surface areas of equiaxed crystals in the structure of centrifugal-cast hollow billets (steel grade 40X25H20C2) allow reducing susceptibility to brittle intercrystalline fracture. Hot cracks of crystallization origin and polygonizational cracks form in castings. It is shown that formation of crystallization cracks is significantly affected by chemical heterogeneity, while formation of polygonizational cracks is affected by substructural heterogeneity caused by formation of secondary boundaries. A significant means to reduce susceptibility of cast steel to generation of microfraction is to control the scale and nature of chemical and substructural heterogeneity. **Originality.** We discuss the main sources of polygonizational formation of secondary grain boundaries in centrifugally-cast steel. **Practical value.** The obtained results allow using the secondary boundaries to inhibit the development of intergranular cracks.

Keywords: centrifugal casting; cracks; grain structure; polygonizational structure; secondary boundaries

Введение

Стремительное развитие способа центробежного литья приводит к его широкому распространению в металлургии. Формирование структуры таких отливок происходит во вращающейся металлической форме в условиях направленного теплоотвода и воздействии поля центробежных сил [1], что оказывают влияние на конечную структуру и свойства центробежнолитых заготовок из высоколегированных жаропрочных сталей.

Цель исследования

Изучение особенностей формирования вторичных границ в процессе кристаллизации центробежно-литой стали 40X25H20C.

Методика

Исследована микроструктура трубных заготовок из стали 40X25H20C2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Особенности образования вторичных зеренных границ в стали 40X25H20C2 исследовали в литом состоянии и после отжига при температурах 1 100 и 1 200 °С с выдержкой один и пять часов. Проводили металлографические «Неофот–21» и электронно-микроскопические исследования JSM–35, «Tesla», ЭМБ–100Б.

Результаты

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; 5]. Проведенные исследования подтвердили влияние технологических параметров на формирование макро- и микроструктуры стали, а также установили зависимость между характером структуры и склонностью отливки к хрупкому межзеренному разрушению. Трещины возникают преимущественно на поверхности или в приповерхностных участках и растут по границам столбчатых кристаллов. В отливках обнаружены как горячие трещины кристаллизационного происхождения, так полигонизационные трещины, хотя последние встречались значительно реже.

Кристаллизационные трещины возникают в процессе кристаллизации дендритов. Их внешним признаком является характерная рельефная структура поверхности. Кроме того, наблюдали трещины вблизи неметаллических включений, а также в зонах ликвации. На образование кристаллизационных трещин большое влияние оказывает химическая микронеоднородность, возникающая при кристаллизации отливок.

Формирование этого дефекта связано с относительным перемещением слоев расплава различной плотности в центробежном силовом поле с большой интенсивностью [1; 11]. Анализ показал, что в центробежнолитых заготовках наблюдается химическое микронеоднородное распределение выделений карбидной фазы (Cr_7C_3) в стыках и междуветвях дендрита. Выделение избыточных карбидов в междуветвях дендритов способствует концентрациям напряжений, что облегчает образование микротрещин.

Отличительными признаками так называемых полигонизационных трещин являются четкая их локализация по вторичным границам, а также гладкие края их поверхности. Как правило, эти трещины связаны с присутствием вблизи вторичных границ включений и карбидов. Необходимо рассмотреть причины возникновения вторичных границ при затвердевании центробежнолитой стали. Основной причиной их формирования являются концентрации напряжений, которые возникают в процессе кристаллизации отливки. Эти напряжения могут быть связаны с различной скоростью вращения различных слоев расплава [8] и, как следствие, с различной скоростью их кристаллизации. Они также возникают в местах перехода от одного затвердевшего слоя к другому, где происходит торможение роста кристаллов (дендритов) и их отдельных ветвей либо локальный изгиб ветвей дендритов при их срастании.

Вполне очевидно, что гидравлические явления, происходящие в расплаве, способствуют локальным турбулентным процессам, о чем свидетельствует специфическое распределение неметаллических включений. Это также способствует локальному изгибу дендритов либо отдельных их ветвей в процессе роста и, как следствие, возникновению локальных напряжений.

Наконец, возникновению напряжений способствует наклон столбчатых кристаллов в сторону вращения, что связано с влиянием конвекционных потоков, которые отклоняют

растущие столбчатые кристаллы (подобно наклону в воде стеблей водорослей) [2; 10]. Кроме того, наклон столбчатых кристаллов в процессе роста связан с преимущественным ростом тех граней, которые обращены навстречу потоку свежего расплава [8; 13].

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.

Высокий уровень напряжений на границах ветвей дендритных кристаллов способствует тому, что вблизи первичных зеренных границ формируются вторичные границы большой протяженности (рис. 1 а), которые часто расположены вдоль дендритных границ и имеют довольно значительную протяженность. В местах торможения роста дендритов и их ветвей в зонах контакта различных зон кристаллизации, а также при наклоне столбчатых кристаллов возникают специфические субструктурные вихревые микрзоны с повышенной плотностью дислокаций, которые в процессе взаимодействия и перераспределения формируют изогнутые либо закрученные вторичные субграницы (рис. 1 б). Такие вторичные границы не имеют большой протяженности и локализованы в зонах субструктурной турбулентности. Химическая неоднородность играет важную роль при формировании вторичной зеренной структуры (рис. 1 в).

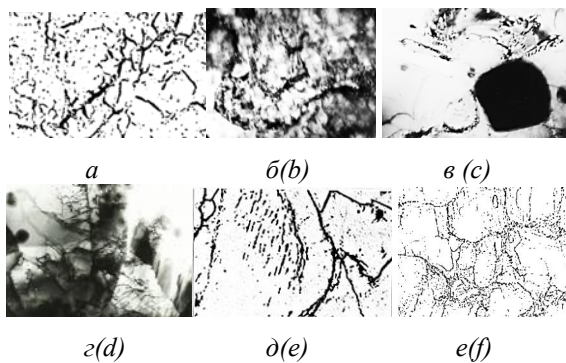


Рис. 1. Образование вторичных зеренных границ в литой и отожженной стали; а, д, е – $\times 2\,000$, б– г – $\times 20\,000$ / Fig. 1. Formation of secondary grain boundaries in cast and annealed steel; а, е, ф – $\times 2\,000$, б– д – $\times 20\,000$

Речь идет не только о зональной ликвации, которая способствует образованию в отливке зон с локальным изменением параметра кристаллической решетки, вызванным неравномерным распределением легирующих элементов, релаксация которых происходит путем образования стенок из краевых дислокаций. В ликвационных зонах возникают градиенты концентрации напряжений, что

вызывает перераспределение вакансий, дислокаций и переползание последних. Все эти процессы способствуют появлению зон с повышенным и неоднородным распределением дислокаций. Образовавшиеся вблизи границ ветвей дендритных кристаллов дислокационные стенки (субграницы) могут замыкаться либо объединяться, формируя вторичные границы большой протяженности. Происходит также фракционирование примесей на этих вторичных границах, что способствует их стабилизации.

Еще одним источником формирования вторичных границ являются неметаллические включения (рис. 1 в). Известно, что различие физических, механических и химических свойств включения и матрицы стали приводит к возникновению напряжений [3; 4; 9], которые имеют термическую природу. Многочисленные расчеты показали, что величина термических напряжений вблизи включений превышает предел текучести стали [4–7], поэтому должна развиваться их пластическая релаксация в зонах матрицы, прилегающих к включениям, что способствует уменьшению напряжений. Вокруг включений создаются «пластические» зоны с повышенной плотностью дислокаций. При этом происходит взаимодействие дислокаций и их перестройка с образованием новых вторичных малоугловых и среднеугловых границ.

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. Сталь, полученная методом центробежного литья, обладает значительной неоднородностью распределения напряжений. Все эти сложные процессы способствуют формированию субструктурной неоднородности и возникновению вторичных границ полигонизационного происхождения.

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 субзерен, так и путем перераспределения дислокаций с образованием границ в участках с повышенной плотностью дислокаций (рис. 1 г).

Еще один механизм образования вторичных границ в процессе отжига связан с испусканием дендритными границами решеточных дислокаций и расщеплением границ зерен (рис. 1 д, е). Очевидно, в

процессе кристаллизации в дендритных (первичных) границах вследствие возникновения напряжений накопилось повышенное количество граничных дефектов, в частности зернограничных дислокаций, перераспределение которых в пределах этих границ в процессе отжига способствует снижению напряжений, что сопровождается испусканием в зерна ансамблей решеточных дислокаций. Происходит взаимодействие этих решеточных дислокаций, что приводит к формированию дислокационных вторичных границ. Следует учитывать неравномерное распределение температуры, влияющее на указанные процессы. [14–15].

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, возникают дисперсные выделения, которые способствуют стабилизации этих субграниц. Увеличение отжига до 5 часов не приводит к полному завершению процессов разупрочнения. При этом полностью не устраняется химическая микронеоднородность зерен аустенита.

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 в условиях изменяющейся температуры, что способствует формированию неоднородной субструктуры и протеканию полигонизационных процессов при постоянно изменяющейся плотности

дислокаций вблизи различных источников концентрации напряжений. При отжиге процессы полигонизационной перестройки дислокационной субструктуры, сформировавшейся в литой стали, продолжаются в условиях постоянной температуры и сопровождаются снижением уровня ликвации и выделением дисперсных фаз на новых вторичных границах. Известно, что полигональные структуры могут затруднять межзеренное разрушение.

Научная новизна и практическая значимость

Выявлено, что вторичные границы формируются в процессе кристаллизации и охлаждения, а также отжига центробежнолитой стали 40X25H20C2 в результате перераспределения дислокаций по полигонизационному механизму.

Выводы

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. При отжиге происходит перестройка дислокационной субструктуры и граничной структуры, 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 литых сталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Центробежное литье : монография / [С. Б. Юдин, М. М. Левин, С. Е. Розенфельд]. – Москва : Машиностроение, 1972. – 415 с.
2. Мовчан Б. А. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах : монография / Б. А. Мовчан. – Киев : Техника, 1970. – 212 с.
3. Неметаллические включения в стали : монография / [С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко]. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
4. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали : монография / С. И. Трофименко. – Москва : Металлургия, 1991. – 225 с.
5. Идельчик И. Е. Гидравлическое сопротивление : монография / И. Е. Идельчик. – Ленинград : Госэнергоиздат, 1954. – 221 с.
6. Саротовкин Д. Д. Дендритная кристаллизация : монография / Д. Д. Саротовкин. – Москва : Металлургиздат, 1953. – 176 с.
7. Дендритная ликвация в сталях и сплавах : монография / [И. Н. Голиков, С. Б. Масленков]. – Москва : Металлургия, 1977. – 224 с.
8. Грабский М. В. Структура границ зерен в металлах : монография / М. В. Грабский. – Москва : Металлургия, 1972. – 160 с.
9. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах : монография / [Б. С. Бокштейн, И. В. Копецкий, Л. С. Швиндлерман]. – Москва : Металлургия, 1986. – 224 с.
10. Структура межкристаллитных и межфазных границ : монография / [В. М. Косевич, В. М. Иевлев, Л. С. Палатник, А. И. Федоренко]. – Москва : Металлургия, 1980. – 256 с.

11. Структура и свойства внутренних поверхностей раздела в металлах : монография / [Б. С. Бокштейн, И. В. Копецкий, Л. С. Швиндлерман и др.]. – Москва : Наука, 1988. – 272 с.
12. Финкель В. М. Физика разрушения : монография / В. М. Финкель. – Москва : Metallurgiya, 1970. – 376 с.
13. Границы зерен и свойства металлов : монография / [О. А. Кайбышев, Р. З. Валиев]. – Москва : Metallurgiya, 1987. – 214 с.
14. Денисенко О. І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 9. – № 1. – 2008. – С. 181–184.
15. Цоцко В. И. Аналитическое моделирование температурного поля одномерного образца в условиях местной термообработки / В. И. Цоцко, И. М. Спиридонова, Б. И. Пелешенко, А. И. Денисенко // Системні технології. – Вип. 3 (56). – Том 2. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 22–29.

REFERENCES

1. Yudin S.B., Levin M.M. and Rozenfeld S.E. *Tsentrobezchnoe lite* [Centrifugal casting]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 415 p. (in Russian).
2. Movchan B.A. *Granitsyi kristallitov v lityih metallah i splavah* [he boundaries of crystallites in cast metals and alloys]. Kyiv : Tehnika, 1970, 212 p. (in Russian).
3. Gubenko S.I., Parusov V.V. and Derevyanchenko I.V. *Nemetallicheskie vklyucheniya v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2005, 536 p. (in Russian).
4. Gubenko S.I. *Transformatsiya nemetallicheskikh vklyucheniy v stali* [Трансформация неметаллических включений в стали]. Moscow : Metallurgiya, 1991, 225 p. (in Russian).
5. Idelchik I.E. *Gidravlichesкое soprotivlenie* [Hydraulic resistance]. Leningrad : GosEnergoizdat, 1954, 221 p. (in Russian).
6. Sarotovkin D.D. *Dendritnaya kristallizatsiya* [Dendritic crystallization]. Moscow : Metallurgizdat, 1953, 176 p. (in Russian).
7. Golikov I.N., and Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyah i splavah* [Dendritic liquation in steels and alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1977, 224 p. (in Russian).
8. Grabskiy M.V. *Struktura granits zeren v metallah* [Structure of grain boundaries in metals]. Moscow : Metallurgiya, 1972, 160 p. (in Russian).
9. Bokshteyn B.S., Kopetskiy I.V. and Shvindlerman L.S. *Termodinamika i kinetika granits zeren v metallah* [Thermodynamics and kinetics of grain boundaries in metals]. Moscow : Metallurgiya, 1986, 224 p. (in Russian).
10. Kosevich V.M., Ievlev V.M., Palatnik L.S. and Fedorenko A.I. *Struktura mezhkristallitnyih i mezhfaznyih granits* [Structure of intergranular and interphase boundaries]. Moscow : Metallurgiya, 1980, 256 p. (in Russian).
11. Bokshteyn B.S., Kopetskiy I.V., Shvindlerman L.S. and oth. *Struktura i svoystva vnutrennih poverhnostey razdela v metallah* [Structure and properties of internal interfaces in metals]. Moscow : Nauka, 1988, 272 p. (in Russian).
12. Finkel V.M. *Fizika razrusheniyam* [Fracture Physics]. Moscow : Metallurgiya, 1970, 376 p. (in Russian).
13. Kaybyishev O.A. and Valiev R.Z. *Granitsyi zeren i svoystva metallov* [Boundaries of grains and properties of metals]. Moscow : Metallurgiya, 1987, 214 p. (in Russian).
14. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himiya tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181–184. (in Russian).
15. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v usloviyah mestnoj termotsikliruoushej obrabotki* [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Siustemnie tehnologii* [System technologies]. Regional Interuniversity collection of scientific papers, Dnipropetrovsk, 2008, iss. 3 (56), vol. 2, pp. 22–29. (in Russian).

Поступила в редакцию 08.02.18

Принята к печати 23.02.18