

УДК 621.74.042:669.017

ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ И ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ МЕЖЗЕРЕННЫХ ТРЕЩИН В ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТЫХ ЗАГОТОВКАХ ИЗ СТАЛИ 40X25H20C2

ГУБЕНКО С.И.^{1*}, *д.т.н, проф.*,
БЕСПАЛКО В.Н.^{2*}, *к.т.н., доц.*,
ЮРКОВСКИЙ В.В.^{3*}, *дир. по тех. развитию*,
БАЛЕВА Ю.И.^{4*}, *аспирант*

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: subenko@email.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

^{2*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 374-82-66, e-mail: valentina.bespalko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

^{3*} ОАО НПО «Трубосталь», пр. Трубников, 4, 53211, Никополь, Днепропетровская область, Украина, тел. (067)561-53-95, e-mail: ogt17@yandex.ru

^{4*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (063) 44-96-757, e-mail: dui2006@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

Аннотация. *Цель.* Исследование причин межзеренной хрупкости и определения оптимальных условий формирования структуры центробежнолитых заготовок из стали 40X25H20C2, при которых исключается возможность образования горячих трещин *Методика.* Исследование структуры и свойств трубных заготовок выполнено на отливках из стали 40X25H20C2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Скорость вращения изложницы варьировали в пределах 900, 1200 и 1500 об/мин. Использовали специальные методы электролитического, химического и теплового травления для выявления зональной и дендритной химической и субструктурной неоднородности, дислокационной структуры. Для качественного и количественного анализа применяли локальный микрорентгеноспектральный анализ. Особенности образования вторичных зеренных границ в стали 40X25H20C2 исследовали в литом состоянии и после термической обработки. *Результаты.* Установлено, что изменения технологических параметров центробежного литья, приводящие к уменьшению зоны трансформации и увеличению поверхностных зон равноосных кристаллов в структуре трубных заготовок из стали 40X25H20C2, 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. Существенным резервом уменьшения склонности литой стали к образованию микротрещин является контроль величины и характера химической и субструктурной неоднородности. *Научная новизна.* Выявлена связь между первичными, дендритными формами кристаллизации аустенита и вторичной зеренной структурой. Полученные результаты подтверждают полигонизационную природу вторичных зеренных границ. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволяет обосновано применять технологические параметры литья, обеспечивающие высокое качество отливок из высоколегированной стали 40X25H20C2.

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

ВПЛИВ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ ТА ЗЕРЕННОЇ СТРУКТУРИ НА УТВОРЕННЯ МЕЖЗЕРЕННИХ ТРИЩИН У ВІДЦЕНТРОВОЛИТІЇ ЗАГОТОВКИ ІЗ СТАЛІ 40X25H20C2

ГУБЕНКО С.І.^{1*}, *д.т.н, проф.*,
БЕСПАЛКО В.Н.^{2*}, *к.т.н., доц.*,
ЮРКОВСЬКИЙ В.В.^{3*}, *дир. по тех. розвитку*,
БАЛЄВА Ю.І.^{4*}, *аспірант*

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sgubenko@email.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

^{2*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 374-82-66, e-mail: valentina.bespalko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

^{3*} ВАТ НВО «Трубосталь», пр. Трубників, 4, 53211, Нікополь, Дніпропетровська область, Україна, тел. (067) 561-53-95, e-mail: ogt17@yandex.ru

^{4*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (063) 44-96-757, e-mail: dui2006@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

Анотація. Мета. Дослідження причин межзеренної крихкості і визначення оптимальних умов формування структури відцентрово литих заготовок із сталі 40X25H20C2, при яких виключається можливість утворення гарячих тріщин **Методика.** Дослідження структури і властивостей трубних заготовок виконано на відливках зі сталі 40X25H20C2, отриманих на горизонтальних машинах відцентрового лиття. Швидкість обертання виливниці варіювали в межах 900, 1200 і 1500 об/хв. Використовували спеціальні методи електролітичного, хімічного і теплового травлення для виявлення зональної і дендритних хімічної та субструктурної неоднорідності, дислокаційної структури. Для якісного та кількісного аналізу застосовували локальний мікрорентгеноспектральний аналіз. Особливості утворення вторинних зерен границь у сталі 40X25H20C2 досліджували в литому стані та після термічної обробки. **Результати.** Встановлено, що зміни технологічних параметрів відцентрового лиття, що призводять до зменшення зони трансресталізації і збільшенню поверхневих зон рівновісних кристалів у структурі трубних заготовок зі сталі 40X25H20C2, дозволяють послабити схильність до крихкого межкристалітного руйнування. У досліджуваних виливках виникають гарячі тріщини кристалізаційного походження, а також полігонізаційні тріщини. Показано, що на утворення кристалізаційних тріщин істотний вплив робить хімічна неоднорідність, а на утворення полігонізаційних тріщин - субструктурна неоднорідність, обумовлює формування вторинних границь. Істотним резервом зменшення схильності литої сталі до утворення мікротріщин є контроль величини і характеру хімічної та субструктурної неоднорідності. **Наукова новизна.** Виявлено зв'язок між первинними, дендритними формами кристалізації аустеніту та вторинної зерен структурою. Отримані результати підтверджують полігонізаційну природу вторинних зерен. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволяє обґрунтовано застосовувати технологічні параметри лиття, що забезпечують високу якість виливків з високолегованої сталі 40X25H20C2.

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

THE INFLUENCE OF DISLOCATION AND GRAIN STRUCTURE ON THE FORMATION OF INTERGRANULAR CRACKS IN CENTRIFUGAL-CAST BILLETS (STEEL GRADE 40X25H20C2)

GUBENKO S.I. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
BESPALKO V. N. ², *Cand. Sc. (Tech.)*
YURKOVSKY V. V. ^{3*}, *Cond.technical development*
BALEVA, Y. I. ^{4*}, *Graduate student*

^{1*} Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, pr. Gagarin, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sgubenko@email.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

^{2*} Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, pr. Gagarin, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. 38 (0562) 374-82-66, e-mail: valentina.bespalko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1977-6197

^{3*} NPO "Trubostal" ave. Trubnikov, 4, 53211, Nikopol, Dnipropetrovsk region, Ukraine, tel. (067) 561-53-95, e-mail: ogt17@yandex.ru

^{4*} Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, pr. Gagarin, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (063) 44-96-757, e-mail: dui2006@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4065-7467

Abstract. Purpose. Investigating the causes of intergranular brittleness and determining the optimal conditions for the structure formation in centrifugal-cast billets (steel grade 40X25H20C2) to eliminate the possibility of hot cracking. **Methodology.** The structure and properties of hollow billets were analyzed using castings (steel grade 40X25H20C2) produced by true centrifugal casting (horizontal centrifugal casting machines). Rotation speed of the mold was varied between 900, 1200 and 1500 rev/min. Ad hoc methods of electrolytic, chemical and thermal etching were used to identify zonal/dendritic chemical and substructure inhomogeneity of the dislocation structure. For qualitative and quantitative assessment the X-ray electron probe analysis was applied. Features of secondary grain boundaries in 40X25H20C2 steel were examined in the cast state following thermal processing. **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.** A relation between the primary dendrite form of austenite and the secondary grain structure was detected. These results confirm the polygonizational nature of secondary grain boundaries. **Practical value.** Application of the obtained results allows substantiate use of casting process parameters, providing high quality of high-alloy steel castings (steel grade 40X25H20C2).

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

Введение

Качество центробежнолитых заготовок и труб, полученных горячим прессованием зависит от условий формирования первичной структуры. Формирование структуры таких отливок происходит во вращающейся металлической форме в условиях направленного теплоотода и воздействия поля центробежных сил [1-4], что оказывают влияние на конечную структуру и свойства центробежнолитых заготовок из высоколегированных жаропрочных сталей [12,13].

Цель

Целью данной работы было исследование причин межзеренной хрупкости и определение оптимальных условий формирования структуры центробежнолитых заготовок из стали 40X25H20C2, при которых исключается возможность образования горячих трещин.

Методика

Исследование структуры и свойств трубных заготовок из стали 40X25H20C2, полученных на горизонтальных машинах центробежного литья. Температура заливки расплава составляла 1450°C, 1550°C и 1600°C. Скорость вращения изложницы варьировали в пределах 900, 1200 и 1500 об/мин. Применяли три типа покрытия внутренней поверхности изложницы: I тип покрытия - покраска; II тип - смесь кварцевого песка – 95% , пульвербакелита – 3 % и борной кислоты – 2 %, III тип - покраска + смесь кварцевого песка, пульвербакелита и борной кислоты. 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 анализа применяли прибор Самеса MS 46. Особенности образования вторичных зеренных границ в стали 40X25H20C2 исследовали в литом состоянии и после отжига при температурах 1100 и 1200°C с выдержкой один и пять часов.

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]. 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.

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 располагаются по границам столбчатых кристаллов. Микротрещины образуются как с наружной, так и с внутренней поверхности литой трубной заготовки. Наличие грубой транскристаллитной структуры по всему сечению заготовки облегчает межзеренное разрушение - микротрещины зарождаются и распространяются по границам столбчатых кристаллов. Уменьшение числа оборотов изложницы, понижение температуры заливки и увеличение теплового сопротивления формы путем нанесения теплоизолирующего покрытия типа смеси на внутреннюю поверхность изложницы способствуют увеличению зоны замороженных и равноосных кристаллов, что снижает склонность отливок к межзеренному разрушению.

В отливках обнаружены как горячие трещины кристаллизационного происхождения, так и полигонизационные трещины, хотя последние встречались значительно реже. Кристаллизационные трещины возникают в температурном интервале кристаллизации, в пограничных зонах первичных дендритов контактирующиеся с жидкой фазой. Внешним признаком кристаллизационных является характерная рельефная структура поверхности трещин.

На образование кристаллизационных трещин большое влияние оказывает химическая микронеоднородность, возникающая при кристаллизации отливок. По склонности к дендритной ликвации примеси и легирующие элементы в стали можно расположить в следующий убывающий ряд: В, С, W, V, Ti, Mo, Si, Al, Cr, Mn, Co, Ni [6-8]. Данных о внутрикристаллической ликвации примесей и легирующих элементов в центробежных заготовках из легированных сталей недостаточно. В работе определяли внутрикристаллическую ликвацию Ni, Cr, Si, Fe в центробежнолитой заготовки 40X25H20C2.

Анализ показал, что в центробежнолитых заготовках химическая микронеоднородное распределение выделений карбидной фазы (Cr_7C_3) в стыках и междуветвях дендрита (рис. 1, а). Тепловое травление позволило выявить обедненный хромом аустенит в виде светлой ободков вокруг избыточной фазы (рис. 1, б). Последующая термическая обработка литых заготовок приводит не только к ослаблению дендритной ликвации, но и к перераспределению легирующих элементов в связи с частичным растворением карбидов. После отжига при 1100°C (1 час) ободочки обедненного легирующими элементами аустенита (в основном хромом) не обнаружены (рис. 1, в). Повышение температуры отжига до 1200°C приводит к

дальнейшему ослаблению дендритной ликвации и уменьшению количества карбидной фазы.

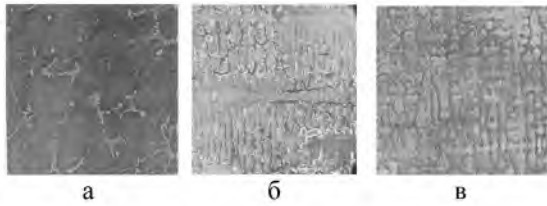


Рис. 1. Химическая микро неоднородность, $\times 50$
Chemical microinhomogeneities, $\times 50$

На образование полигонизационных трещин большое влияние оказывает субструктурная неоднородность, которая связана с формированием вторичных полигональных границ. Трещины, возникающие в процессе формирования вторичных границ, образуются после завершения кристаллизации расплава. Отличительными чертами этого вида трещин являются четкая их локализация трещины по вторичной границе, а также гладкие края поверхности.

Исследовали образование вторичных зеренных границ в стали 40X25H20C2 в литом состоянии и после высокотемпературного отжига. Начальные стадии образования вторичных границ связаны с накоплением избыточных дислокаций преимущественно по границам ветвей дендритов, их перераспределением и формированием малоугловых субзеренных границ. В участках с локальным изменением параметра кристаллической решетки, вызванным неравномерным распределением легирующих элементов, возникают напряжения, релаксация которых происходит путем образования стенок из краевых дислокаций. Химическая неоднородность играет важную роль при формировании вторичной зеренной структуры. Образовавшиеся по границам ветвей дендритных кристаллов дислокационные стенки (субграницы) могут замыкаться либо объединяться, формируя вторичные границы большой протяженности (рис. 2, а, б). Высокий уровень напряжений на границах ветвей дендритных кристаллов, вызывающий формирование вторичных зеренных границ, способствует образованию микротрещин при охлаждении отливок (рис. 2, в).

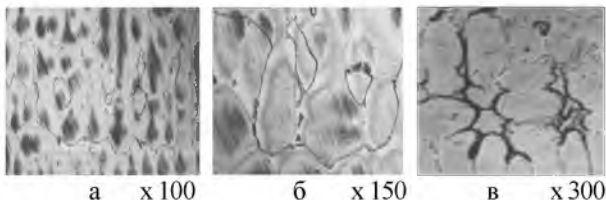


Рис.2. Образование вторичных зеренных границ
Formation secondary grain boundaries

Выделение избыточных карбидов в междуветвях дендритов также облегчает образование микротрещин. Полученные в работе данные позволили установить, что причины

образования микротрещин в междуветвях дендритных кристаллов, а также вторичных зеренных границ аналогичны и связаны с перераспределением дислокаций. Механизм возникновения микротрещин вдоль субграниц связан с образованием в локальных участках высокой плотности дефектов. Большая плотность дефектов в закристаллизованном металле, а также высокая температура в сочетании с действием напряжений, способствуют интенсивному перераспределению несовершенств решетки и сокращению времени образования трещин.

Исследования образования вторичных зеренных границ в стали 40X25H20C2 в литом состоянии и после высокотемпературного отжига показали, что вторичные границы формируются как в результате образования и укрупнения субзерен, так и путем перераспределения дислокаций с образованием границ в участках с повышенной плотностью дислокаций. Выявлена связь между первичной, дендритной формой аустенита и вторичной зеренной структурой на ранних стадиях ее образования. Полученные результаты подтверждают полигонизационную природу вторичных зеренных границ. Установлено, что высокая и неравномерная плотность дислокаций в отливках из стали 40X25H20C2 определяет сложный характер изменений дислокационной структуры в процессе полигонизации и рекристаллизации при высокотемпературном отжиге. Очевидно, что полигональные структуры могут затруднять межзеренное разрушение.

При высокотемпературном отжиге процессы полигонизации и рекристаллизации протекают крайне неравномерно, поэтому увеличение отжига до 5 часов не приводят к полному завершению процессов разупрочнения. При этом не устраняется химическая микро неоднородность в кристаллах аустенита. Для ее устранения, как и для устранения связанной с ней субструктурной микро неоднородностью, требуются более продолжительные выдержки при отжиге.

Научная новизна и практическая значимость

Выявлена связь между первичной, дендритной формой аустенита и вторичной зеренной структурой. Полученные результаты подтверждают полигонизационную природу вторичных зеренных границ.

Использование полученных результатов позволяет обосновано применять технологические параметры литья, обеспечивающие высокое качество отливок из высоколегированной стали 40X25H20C2.

Выводы

Исследования показали, что изменение технологических параметров центробежного литья, приводящее к уменьшению зоны

транскристаллизации и увеличению поверхностных зон равноосных кристаллов в структуре трубных центробежнолитых заготовок из стали 40X25H20C2, позволяет ослабить склонность к хрупкому межкристаллитному разрушению. В 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. Выявлена связь между первичной, дендритной формой кристаллов аустенита и вторичной зеренной структурой.

Существенным резервом уменьшения склонности литой стали к образованию микротрещин является контроль величины и характера химической и субструктурной неоднородности, в частности уменьшение ликвации легирующих элементов и примесей и создание термически стабильных полигональных структур.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Рулла Н. В., Самойлов Г. М., Студинский М. М. Производство труб: Сборник статей. – М.: Metallurgija, 1961. – 356 с. [Rulla N. V., Samojlov G. M., Studinskij M. M. Proizvodstvo trub: Sbornik statej. – М.: Metallurgija, 1961. – 356 p.] <http://www.twirpx.com/file/55095/>
2. Юдин С. Б., Левин М. М., Розенфельд С. Е. Центробежное литье. – М.: Машиностроение, 1972. – 415 с. [Judin S. B., Levin M. M., Rozenfel'd S. E. Centrobezhnoe lit'e. – М.: Mashinostroenie, 1972. – 415 p.] <http://bookre.org/reader?file=1470710>
3. Степанов Ю. А. и др. Специальные виды литья. – М.: Машиностроение, 1970. – 365 с. [Stepanov Ju. A. i dr. Special'nye vidy lit'ja. – М.: Mashinostroenie, 1970. – 365 p.] <http://www.twirpx.com/file/991159/>
4. Бутаков Д.К. Технологические основы повышения качества легированной стали для отливок. – М.: “Машгиз”, 1968. – 273с. [Butakov D.K. Tehnologicheskie osnovy povyshenija kachestva legirovannoj stali dlja otlivok. – М.: “Mashgiz”, 1968. – 273p.] <http://www.twirpx.com/file/969599/>
5. Бороновский И.Б. Локальные методы анализа материалов. – М.: Metallurgija, 1983. – 191с. Boronovskij I.B. Lokal'nye metody analiza materialov. – М.: Metallurgija, 1983. – 191p.] <http://library.univer.kharkov.ua/OpacUnicode/index.php?url=/notices/index/IdNotice:715739/Source:default>
6. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых металлах и сплавах. – Киев. 1962. – 340с. [Movchan B.A. Mikroskopicheskaja neodnorodnost' v lityh metallah i splavah. – Kiev. 1962. – 340p.] http://books.zntu.edu.ua/book_info.pl?id=173554

7. Голиков И.Н. Дендритная ликвация в стали. – М.: Metallurgija 1970 – 341с. [Golikov I.N. Dendritnaja likvacija v stali. – М.: Metallurgija 1970 – 341p.] <http://www.twirpx.com/file/968548/>
8. Солнцев Ю.П., Прягин Е.И., Войткун Ф. материаловедение. – М.: “Мисис”, 1999. – 600с. [Solncev Ju.P., Prjagin E.I., Vojtkun F. Materialovedenie. – М.: “Misis”, 1999. – 600p.] <http://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=128628>
9. Мовчан Б.А. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах. – Киев.1970. – 358с [Movchan B.A. Granicy kristallitov v lityh metallah i splavah. – Kiev.1970. – 358p] <http://www.twirpx.com/file/1055556/>
10. Алферова Н. С., Пищик Н. С. Кристаллизация и фазовые превращения: Сборник. – М.: Metallurgija, Минск 1971.- 185 с. [Alferova N. S., Pishhik N. S. Kristallizacija i fazovye prevrashhenija: Sbornik. – М.: Metallurgija, Minsk, 1971.- 185 p.] <http://www.livelib.ru/publisher/648/books>
11. Дэвис Дж. (ред.) . Жаропрочные материалы, 1997 , ISBN : 591с/ Davis J.R. (Ed.) Heat Resistant Materials ASM International, 1997, ISBN: 0871705966, 591p <http://www.twirpx.com/file/703573/>
12. Захаров М.В., Захаров А.М. Жаропрочные сплавы. – М.: “Metallurgija”, 1972. – 384. [Zaharov M.V., Zaharov A.M. Zharoprochnye splavy. – М.: “Metallurgija”, 1972. – 384p.] http://books.zntu.edu.ua/book_info.pl?id=88806
13. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали М.: Metallurgija, 1976. - 216 с.[Lanskaja K.A. Vysokohromistye zharoprochnye stali М.: Metallurgija, 1976. - 216 p] <http://www.twirpx.com/file/961830/>

Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром.физ.-мат.наук, проф. Д. В. Лаухин (Украина)

Поступила в редколлегию 21.03.2015

Принята к печати 24.03.2015