

УДК 621.74.042:669.017

## К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ ГРАНИЦ В ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТОЙ СТАЛИ 40X25H20C2

ГУБЕНКО С.И.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
БЕСПАЛЬКО В.Н.<sup>2\*</sup>, *к.т.н., доц.*,  
ЮРКОВСКИЙ В.В.<sup>3\*</sup>, *дир. по тех. развитию*,  
БАЛЕВА Ю.И.<sup>4\*</sup>, *аспирант*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 41-03-57, e-mail: sgubenko@email.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

<sup>2\*</sup> 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

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

<sup>4\*</sup> 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.* Изучение особенностей формирования вторичных границ в процессе кристаллизации центробежнолитой 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 1100 и 1200°C 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

## ДО ПИТАННЯ ПРО ФОРМУВАННЯ ВТОРИННИХ ГРАНИЦЬ У ВІДЦЕНТРОВОЛИТОЙ СТАЛІ 40X25H20C2

ГУБЕНКО С.І.<sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
БЕСПАЛЬКО В.Н.<sup>2\*</sup>, *к.т.н., доц.*,  
ЮРКОВСЬКИЙ В.В.<sup>3\*</sup>, *дир. по тех. розвитку*,  
БАЛЄВА Ю.І.<sup>4\*</sup>, *аспірант*

<sup>1\*</sup> 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

<sup>2\*</sup> 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

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

<sup>4\*</sup> 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.* Вивчення особливостей формування вторинних границь в процесі кристалізації відцентровою сталі 40X25H20C. *Методика.* Досліджено микроструктура трубних заготовок з сталі 40X25H20C2, отриманих на горизонтальних машинах відцентрового лиття. Особливості утворення вторинних зерен границь в сталі 40X25H20C2 досліджували в литому стані і після відпалу при температурах 1100 і 1200°C з витримкою одну і п'ять годин. Проводили металграфічні (Неофот-21) та електрономікроскопічні дослідження JSM-35, "Tesla", ЕМВ-100Б. *Результати.* Зміни технологічних параметрів відцентрового лиття, що призводять до зменшення зони трансформации і збільшення

поверхневих зон рівновісних кристалів в структурі, дозволяють послабити схильність до крихкого межкристалітного 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, обумовлюється формуванням вторинних границь. **Наукова новизна.** Обговорюються основні джерела утворення вторинних границь у відцентрово-литій сталі по полігонізаційному механізму. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють використовувати вторинні границі для гальмування розвитку межзерених тріщин.

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

## ON THE FORMATION OF SECONDARY BORDER CENTRIFUGAL CAST STEEL 40X25H20C2

GUBENKO S.I. <sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*  
BESPALKO V. N. <sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*  
YURKOVSKY V.V. <sup>3\*</sup>, *Cond.technical development*  
BALIEVA, I. I. <sup>4\*</sup>, *Graduate student*

<sup>1\*</sup> 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

<sup>2\*</sup> 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

<sup>3\*</sup> NPO "Trubostal" ave. Trubnikov, 4, 53211, Nikopol, Dnipropetrovsk region, Ukraine, tel. (067) 561-53-95, e-mail: ogt17@yandex.ru

<sup>4\*</sup> 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.** 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 1100°C and 1200°C and equalizing for one and five hours. Metallographic (Neophot-21) and electron microscopic (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 широкому распространению в металлургии. Формирование структуры таких отливок происходит во вращающейся металлической форме в условиях направленного теплоотвода и воздействия поля центробежных сил [1], что оказывают влияние на конечную структуру и свойства центробежнолитых заготовок из высоколегированных жаропрочных сталей.

### Цель

Изучение особенностей формирования вторичных границ в процессе кристаллизации центробежнолитой 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 1100 и 1200°C с выдержкой один и пять час. Проводили металлографические (NEOPHOT-21) и электронномикроскопические исследования JSM-35, "Tesla", ЭМВ-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 их 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 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, 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, к 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 большего 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).

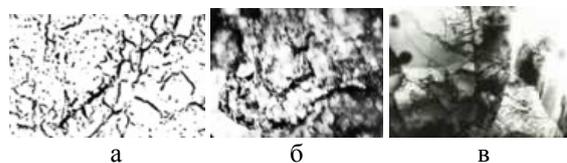


Рис. 1. Образование вторичных зеренных границ в литой и отожженной стали; а–  $\times 2000$ , б, в –  $\times 20000$ / Formation of secondary grain boundaries in cast and annealed steel а–  $\times 2000$ , б, в –  $\times 20000$

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. 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 пластическая их 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 сформировавшихся 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, в). Еще один механизм образования вторичных границ в процессе отжига связан с испусканием дендритными границами решеточных дислокаций. 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.

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 час не приводят 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, продолжают 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 формированию новых вторичных границ. Формирование вторичных границ следует рассматривать как фактор упрочнения и повышения уровня механических характеристик центробежнолитых сталей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

### REFERENCES

1. Yudin S. B., Levin M. M., Rozenfeld S. E. *Tsentrobezhnoe lite* [Spun casting]. - M.: Mashinostroenie, 1972. – 415 s. (in Russian).
2. Movchan B.A. *Granitsyi kristallitov v lityih metallah i splavah* [The boundaries of the crystallites in cast metals and alloys]. K., Tehnika, 1970, 212s. (in Russian).
3. Gubenko S.I., Parusov V.V., Derevyanchenko I.V. *Nemetallicheskie vkhlyucheniya v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 2005, 536s. (in Russian).
4. Gubenko S.I. *Transformatsiya nemetallicheskih vkhlyucheny v stali* [Transformation of non-metallic inclusions in steel]. – M.: Metallurgiya, 1991. – 225 s. (in Russian).
5. Idelchik I.E. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Pressure drop]. - L.: GosEnergoizda, 1954. – 221s. (in Russian).
6. Sarotovkin D.D. *Dendritnaya kristallizatsiya* [dendritic crystallization]. - M. : Metallurgizdat, 1953. – 176s. (in Russian).
7. Golikov I.N., Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyah i splavah* [Dendritic segregation in steels and alloys]. - M.: Metallurgiya, 1977. – 224 s. (in Russian).
8. Grabskiy M.V. *Struktura granits zeren v metallah* [The structure of grain boundaries in metals]. M., Metallurgiya, 1972, 160s. (in Russian).
9. Bokshteyn B.S., Kopetskiy I.V., Shvindlerman L.S. *Termodinamika i kinetika granits zeren v metallah* [Thermodynamics and Kinetics of grain boundaries in metals]. - M.: Metallurgiya, 1986. – 224 s. (in Russian).
10. Kosevich V.M., Ievlev V.M., Palatnik L.S., Fedorenko A.I. *Struktura mezhkristallitnykh i mezhfaznykh granits* [The structure of intergranular and interphase boundaries]M.: - Metallurgiya, 1980. – 256 s. (in Russian).
11. Bokshteyn B.S., Kopetskiy I.V., Shvindlerman L.S. i dr. *Struktura i svoystva vnutrennih poverhnostey razdela v metallah* [The structure and properties of the internal interfaces of metals]- M.: Nauka, 1988. – 272 s. (in Russian).
12. Finkel V.M. *Fizika razrusheniya* [Destruction Physics]. - M.: Metallurgiya, 1970. – 376 s. (in Russian).
13. Kaybyishev O.A., Valiev R.Z. *Granitsyi zeren i svoystva metallov* [Grain boundaries and properties of metals]. - M.: Metallurgiya, 1987. – 214 s. (in Russian).

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