

УДК621.774.35

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.107.16

ТРАНСФОРМАЦИЯ БОРИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ГУБЕНКО С.И.¹, *д.т.н, проф.*,
БЕСПАЛЬКО В.Н.², *к.т.н., доц.*

¹Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

²Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1977-6197

Аннотация. *Цель.* Проблема влияния неметаллических включений технологическую пластичность сталей является актуальной. Целью работы было исследование поведения боридных включений при пластической деформации и их влияние на технологические свойства стали 04X14T3P1F на всех этапах производства горячекатаных труб. *Методика.* Микроструктуру стали 04X14T3P1F и боридные включения изучали с помощью оптического микроскопа «Neophot - 21». Для определения состава боридов использовали микроанализатор РЭММА 102-02. Проводили испытания на растяжение с целью определения механических свойств стали 04X14T3P1F. *Результаты.* В стали 04X14T3P1F установили наличие боридов на основе хрома, железа и титана. Исследованы закономерности изменения морфологии, размеров и химико-минералогического состава боридов в процессе пластической деформации. Определены размеры и распределение боридов в исходной трубной заготовке, гильзе после первой прошивки и готовых горячекатаных трубах. Показано влияние боридов на технологическую пластичность стали 04X14T3P1F. Обосновано их влияние на зарождение разрушения стали 04X14T3P1F на разных стадиях производства труб для атомной энергетики. *Научная новизна.* Идентифицированы основные типы боридных включений в высокохромистой стали, а также проанализировано перераспределение в них элементов при деформационно-тепловом воздействии. Рассмотрены закономерности трансформации боридов при пластической деформации и их влияние на свойства стали 04X14T3P1F. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволило уточнить технологические режимы деформации стали 04X14T3P1F на разных этапах получения труб для атомной энергетики.

Ключевые слова: высоколегированная сталь, боридные включения, пластическая деформация, трубы.

ТРАНСФОРМАЦІЯ БОРИДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТРУБ ДЛЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

ГУБЕНКО С.І.¹, *д.т.н, проф.*,
БЕСПАЛЬКО В.М.², *к.т.н., доц.*

¹Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

²Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1977-6197

Анотація. *Мета.* Проблема впливу неметалевих включень технологічну пластичність сталей є актуальною. Метою роботи було дослідження поведінки боридних включень при пластичній деформації і їх впливу на технологічні властивості сталі 04X14T3P1F на всіх етапах виробництва гарячекатаних труб. *Методика.* Микроструктуру сталі 04X14T3P1F та боридних включень вивчали за допомогою оптичного мікроскопу «Neophot - 21». Для визначення складу боридов використовували мікроаналізатор Ремм 102-02. Проводили випробування на розтягнення з метою визначення механічних властивостей сталі 04X14T3P1F. *Результати.* В сталі 04X14T3P1F установили наявність боридів на основі хрому, заліза і титану. Досліджені закономірності зміни морфології, розмірів і хіміко-мінералогічного складу боридів в процесі пластичної деформації. Визначено розміри і розподіл боридів в вихідній трубній заготовці, гільзі після першої прошивки і готових гарячекатаних трубах. Показано вплив боридів на технологічну пластичність сталі 04X14T3P1F. Обґрунтовано їх вплив на зародження руйнування сталі 04X14T3P1F на різних стадіях виробництва труб для атомної енергетики. *Наукова новизна.* Ідентифіковані основні типи боридних включень в високохромистій сталі, а також проаналізовано перерозподіл в них елементів при деформаційно-тепловій дії. Розглянуто закономірності трансформації боридів при пластичній деформації та їх вплив на властивості сталі 04X14T3P1F. *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволило уточнити технологічні режими деформації сталі 04X14T3P1F на різних етапах отримання труб для атомної енергетики.

Ключові слова: високолегована сталь, боридні включення, пластична деформація, труби.

TRANSFORMATION OF BORID INCLUSIONS UNDER PRODUCING OF PIPES FOR NUCLEAR POWER

GUBENKO S.I.¹, DR. SC. (TECH.), PROF.

BESPALKO V.N.², CAND. SCI (TECH), ASS. PROF.

¹Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnepr, Ukraine, phone +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

²Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnepr, Ukraine, phone +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1977-6197

Abstract. Purpose. The problem of the influence of nonmetallic inclusions is the technological plasticity of steels is actual. The goal of the work was to study the behavior of boride inclusions under plastic deformation and their effect on the technological properties of 04H14T3R1F steel at all stages of production of hot-rolled pipes. **Methods.** The microstructure of steel 04H14T3R1F and boride inclusions were studied with the help of the Neophot-21 optical microscope. A micro-analyzer REMMA 102-02 was used to determine the composition of borides. Tensile tests were conducted to determine the mechanical properties of steel 04H14T3R1F.

Results. In steel 04H14T3R1F became the presence of borides based on chromium, iron and titanium. The patterns of morphology, size and chemical-mineralogical composition of borides in the process of plastic deformation were studied. The sizes and distribution of borides in the original tube billet, liner after the first piercing and finished hot-rolled pipes were determined. The influence of borides on the technological plasticity of steel 04H14T3R1F was shown. Their influence on the nucleation of the destruction of steel 04H14T3R1F at different stages of production of pipes for nuclear power engineering was substantiated. **Scientific novelty.** The main types of boride inclusions in high-chromium steel were identified, and the redistribution of elements in them under deformation-thermal action was analyzed. The regularities of boride transformation during plastic deformation and their influence on the properties of 04X14T3P1F steel were considered. **Practical significance.** The use of the obtained results made it possible to clarify the technological regimes of deformation of steel 04P14T3K1A at different stages of obtaining pipes for nuclear power.

Keywords: high-alloy steel, boride inclusions, plastic deformation, pipes.

Введение

Разработка и совершенствование конструкционных материалов для оборудования нового поколения АЭС повышенной безопасности и ресурса является актуальной задачей [1]. Из высокохромистой стали с бором изготавливают шестигранные трубы, которые используют в качестве чехлов отработанных топливных кассет атомных электростанций [2 – 4, 8]. Введение в сталь бора способствует появлению боридов, которые оказывают неблагоприятное влияние на горячую технологическую пластичность. Свойства получаемых труб во многом определяются качеством, структурой исходной трубной заготовки и в первую очередь, содержанием неметаллических включений.

Цель

Целью работы было исследование поведения боридных включений при пластической деформации и их влияние на технологические свойства стали 04X14T3P1F на всех этапах производства горячекатаных труб.

Материалы и методики

Исследования проводили на образцах стали 04X14T3P1F, отобранных от трубных заготовок, а также от горячекатаных труб на различных этапах их производства [2 - 4]. Деформацию осуществляли в интервале температур 1000...1150°C (через 50°C), при угле подачи 5°30', число оборотов валков – 40

об/мин. Микроструктуру стали изучали с помощью оптического микроскопа «Neophot - 21». Для определения состава боридов использовали микроанализатор РЭММА 102-02.

Результаты исследования и их обсуждение.

Микроструктура стали состоит из крупных и мелких боридов разной формы, неравномерно распределенных в ферритной матрице. В результате исследований установили наличие в стали 04X14T3P1F боридов на основе хрома, железа и титана. Анализ диаграмм состояния двойных и многокомпонентных систем Fe-B, Cr-B, Ti-B, Fe-B-Cr, Ti-B-Cr и других [7, 11] показал, что в исследуемой стали при температурах горячей деформации возможны фазовые превращения не только в матрице, но и в самих бориде, которые могут оказывать влияние на технологические свойства стали. С помощью рентгеновского спектрометра анализировали содержание элементов в бориде и ферритной матрице. На рис.1 приведены изображения микроструктуры образца после горячей деформации при 1100°C, полученные в характеристическом излучении бора, хрома, титана, железа и ванадия.

Анализ показал, что бор и ванадий равномерно распределены в матрице и включениях боридных фаз, однако в темных включениях концентрация этих элементов выше (рис. 1 а, б, е). Хром равномерно распределен в матрице и светлой фазе, в темных включениях его содержание незначительно (рис. 1 а, в). Титан образует бориды типа Ti₂B –

включения темной фазы (рис. 1 а, г), в которых также присутствует ванадий. В матрице и светлой фазе железо распределено равномерно, в темной фазе содержание железа значительно выше в центральных участках (рис. 1 а, д). Полученные данные позволяют предположить, что основой темных включений является борид $(\text{Ti,Fe,V})_2\text{B}$, окруженный боридной фазой $(\text{Ti,V})_2\text{B}$. Светлая фаза представляет собой борид на основе хрома и железа - $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$. Ферритная матрица исследуемой стали в основном легирована хромом и в небольшом количестве - ванадием, бором. Для проведения количественного анализа были отобраны образцы стали после деформации при температурах 1100, 1150°C. Количественный анализ показал, что содержание титана в темных боридов было

максимальным и составляло 48...76%, содержание железа было больше в центральной части боридов (17...23%), по сравнению с периферийной (3,6...5,9%), а содержание хрома отличалась незначительно. Можно принять, что основой темных боридов служит сложный борид на основе титана состава $(\text{Ti,Fe,Cr})_2\text{B}$, а оболочкой является борид $(\text{Ti,Cr})_2\text{B}$, в котором присутствует фаза, содержащая ванадий. Повышение температуры деформации облегчает диффузионное перераспределение элементов в боридов: содержание бора уменьшалось до 8...9%, а содержание титана увеличивалось как в центральной, так и в периферийных участках темных боридов; содержание хрома и железа изменялось незначительно.

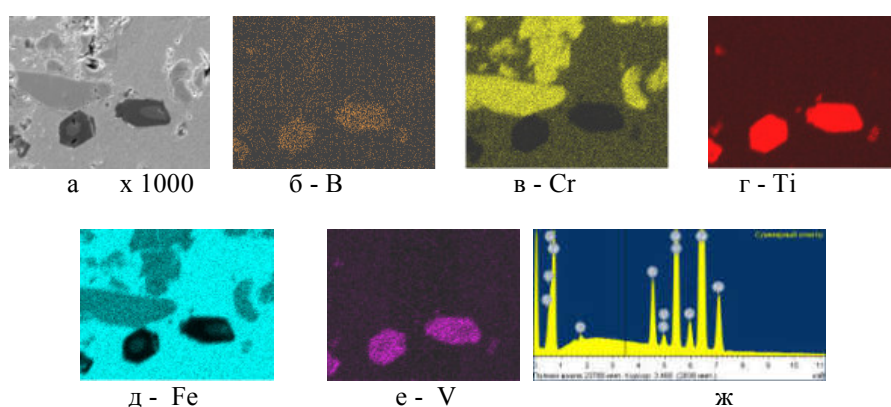


Рис. 1. Микроструктура стали 04X14T3P1Φ (а), распределение элементов в стальной матрице и боридов(б - ж)

При анализе содержания легирующих элементов в светлых боридов отмечали колебания содержания хрома и железа, содержание титана было достаточно низким и составляло 0,76...0,93%. При температуре 1100 °C в частицах светлой фазы количество хрома и железа находилось примерно на одинаковом уровне (48...51%), повышение температуры деформации приводило к перераспределению элементов в этой фазе: содержание железа повышалось до 69...78%, а хрома понижалось до 19 ...30%. В отдельных участках светлой фазы определено содержание бора, которое было невелико и составляло 1,4%. Полученные данные свидетельствуют о том, что светлая фаза является фазой на основе железа, или железа и хрома; содержание бора в этой фазе невелико. Повышение температуры деформации изменяет состав светлой фазы. Повышение температуры деформации способствует диффузионному перераспределению легирующих элементов в боридов, которое приводит к изменению их состава и структуры. Возможно, при более

высокой температуре деформации осуществляется превращение $(\text{Ti,Fe,Cr})_2\text{B} \rightarrow (\text{Fe,Cr})_2\text{B}$. В матрице исследуемой стали содержится 83 % Fe; 15,5 % Cr; 0,29% V и 0,38% Si.

Влияние температуры пластической деформации на структурные превращения в высокохромистой стали с бором исследовали на образцах после горячей деформации при температурах 1100 и 1150°C. Крупные бориды на основе хрома удлиненной формы при пластической деформации дробились на фрагменты и хрупко разрушались уже при малых степенях деформации (рис. 2, а). Включения боридов на основе титана являются двухфазными и многофазными частицами, деформация которых способствует локализации напряжений, что приводит к образованию микротрещин и их распространению по границам фаз, облегчая дальнейшее разрушение боридов (рис. 2, б). Это способствует увеличению степени их дисперсности.

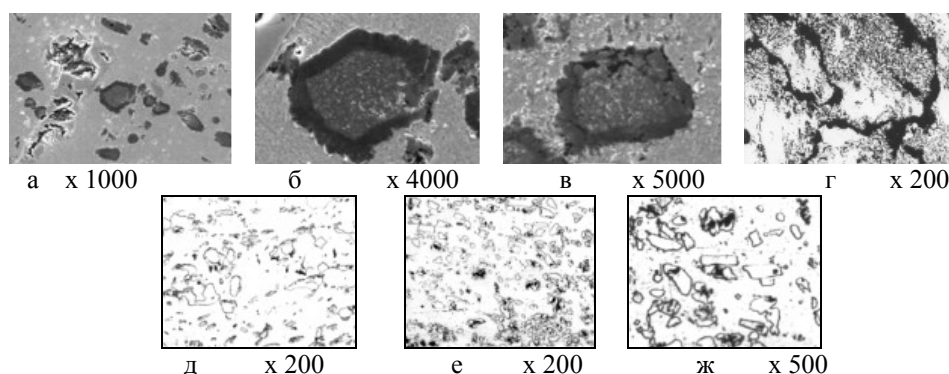


Рис. 2. Бориды после деформации при температурах 1100 °С (а, б) и 1150°С (в, г) и микроструктура стали 04Х14ТЗР1Ф: д – гильза; е, ж – труба

Горячая деформация при температурах выше 1150°С активизирует диффузионные процессы, проходящие как в матрице, так и в боридов, способствуя делению боридов, а также образованию большого количества дисперсных фаз. Возле крупных боридов наблюдали выделение дисперсных частиц (рис. 2, в). Анализ структуры стали после деформации при 1150°С показал, что диффузионное взаимодействие боридов с матрицей приводит к дроблению, растворению и выделению новых включений. При более высокой температуре в процессе деформации, происходят структурные превращения в самих боридов. Развитие этих процессов изменяет строение и состав боридов на основе титана и способствует их разрушению (рис. 2, г). Полученные данные показали, что при горячей деформации диффузионное взаимодействие боридов с матрицей приводит к изменению не только формы, но и строению боридов. Следует учитывать неоднородное распределение температуры в заготовках и трубах в процессе деформации [6, 9, 10].

Исследования показали, что высокохромистая сталь с бором обладает удовлетворительной пластичностью в интервале температур 1000...1100°С, в этом случае критическое обжатие равнялось 14,3%. Прокатка конических образцов при температурах 1150°С и выше затруднялась из-за разрушения образца с переднего конца (при обжатиях 3...7%). Прокатка заднего конца (обжатия равны 14%) проходила удовлетворительно. В работе [5] показано, что общая пластичность стали 04Х14ТЗР1Ф примерно в 1,5 раза ниже по сравнению со сталью 12Х18Н10Т. Следовательно, прошивка трубных заготовок из этой стали возможна при более низких температурах 1025...1050°С. Исследование микроструктуры образцов после небольших степеней деформаций 3...7 % и

повышенных температурах (> 1150°С) показали, что разрушение образцов связано с наличием грубых включений боридов. Пластическая деформация стали при $\epsilon = 14$ % проходила удовлетворительно, однако, также происходило разрушение боридов и возникали трещины в стальной матрице.

Наличие боридов оказывает значительное влияние на изменение механических и технологических свойств в процессе производства горячекатаных труб. В таблице 1 приведены механические характеристики образцов, отобранных после различных операций производства горячекатаных труб. Полученные данные свидетельствуют о том, что значительное изменение механических характеристик, в особенности пластичности, происходит в процессе прошивки трубной заготовки в гильзу, где осуществляется основная деформация металла. Дальнейшие переделы при производстве горячекатаных труб повышают значения прочностных характеристик, ударной вязкости и незначительно снижают пластичность.

Механические характеристики стали в значительной мере определяются структурой, которая формируется в процессе пластической деформации. Анализировали изменение размеров и распределение боридов в исходной трубной заготовке, гильзе и горячекатаных трубах. Также определяли микротвердость матрицы стали и боридов разного типа в исходной заготовке и после горячей деформации. В образцах, отобранных от заготовки и от гильз после первой прошивки, присутствуют более крупные бориды обоих типов. Размер боридов на основе Fe-Cr и боридов на основе Fe-Ti, соответственно равен 90 - 15 мкм и 55 - 10 мкм. Для заготовки значения микротвердости матрицы, боридов на основе Fe-Cr и боридов на основе Fe-Ti, соответственно составляли 2630, 3830 и 5490 МПа.

Таблица 1.

Механические характеристики стали 04Х14ТЗР1Ф

Операция производства	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
Исходная заготовка	435...452	320...372	8...10	5...6
Гильза	480...510	310...330	16...18,5	6...7
Горячекатаная труба	550...586	410...445	13,0...15,5	10...19

Микроструктура горячекатаной гильзы представляет собой вытянутые в направлении прокатки строчки боридов средних размеров неравномерно расположенных в ферритной матрице (рис. 2, д). При горячей деформации происходит разрушение (дробление) боридов, наблюдается строчечное их расположение (рис. 2, е, ж). Последующая прокатка способствует более равномерному распределению и получению более мелких включений боридов. Средний размер боридов на основе Fe-Cr в данном случае составлял 45...10 мкм, а боридов на основе Fe-Ti 20...5 мкм. Разрушение включений боридов происходит на всех стадиях прокатки и приводит к изменению их дисперсности и распределения в матрице. Значения микротвердости матрицы, боридов на основе Fe-Cr и

Fe-Ti в образцах стали после горячей деформации, соответственно составляли 3210, 5490 и 7860 МПа. Полученные данные и анализ микроструктуры стали после горячей деформации свидетельствуют о развитии процессов упрочнения в бориде.

Выводы. Идентифицированы основные типы боридных включений в высокохромистой стали, проанализировано перераспределение в них элементов при деформационно-тепловом воздействии. Рассмотрено изменение морфологии боридов при пластической деформации и их влияние на свойства стали 04X14T3P1Ф. Получение в ходе горячей деформации более равномерного распределения и диспергированных боридов значительно улучшает свойства горячекатаных труб из стали 04X14T3P1Ф.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горынин И.В. Разработка и совершенствование конструкционных материалов для оборудования нового поколения АЭС повышенной безопасности и ресурса / Горынин И.В., Карзов Г.П., Филимонов Г.Н., Козлов Р.А., Цуканов В.В. // В кн. Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. - Киев: Наукова думка. 1998. - С. 279-283.
2. Губенко С.И. Неметаллические включения в стали: монография / Губенко С.И., Ошкадеров С.П. - Киев: Наукова думка. 2016. - 528с.
3. Губенко С.И. Исследование технологической пластичности бористой стали при разных режимах деформации / Губенко С.И., Беспалько В.Н., Жиленкова Е.В., Балева А.Е. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. труд. ПГАСА. - вып. 32. - ч.1. - серия «Стародубовские чтения 2005». – Днепропетровск: 2005. - с. 231- 236.
4. Губенко С.И. Влияние температуры и степени деформации на характер изменения эвтектических боридов в высокохромистой стали с бором / Губенко С.И., Беспалько В.Н., Жиленкова Е.В. // Теория и практика металлургии. - 2006. - № 4-5.- с.158-160.
5. Губенко С.И. Влияние различных способов выплавки на качество трубных заготовок из высокохромистой стали с бором / Губенко С.И., Беспалько В.Н., Жиленкова Е.В. // Сучасні проблеми металургії.. - т. 11. - Пластична деформація металів. Теорія і виробництво труб. Сб. наук. праць НМетАУ. – Дніпропетровськ: 2008. - с.78-83.
6. 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.
7. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Справочник. / Под редакцией О.А. Банных., М. Е. Дриза. // М.: Металлургия. – 1986. – 439 с.
8. Пройдак Ю. Influence of Non-Metallic Inclusions on the Structural Heterogeneity of High-Alloy Steels / Пройдак Ю., Губенко С., Беспалько В. // Chestochowa University of Technology. Chestochowa. – 2013. - v.2. - p. 128-134.
9. Цоцко В.И. Температурные характеристики поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей в условиях линейного нагрева поверхности. / Цоцко В.И., Денисенко А.И. // Вісник Дніпропетровського національного університету, 2004, №2: 72-
10. Цоцко В.И. Аналитическое моделирование поля температур одномерного образца в условиях местной термоциклирующей обработки / В.И. Цоцко, И.М. Спиридонова, Б.И. Пелешенко, А.И. Денисенко // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. – Том 10. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2007. – С. 170-178.
11. Шанк Ф. Структура двойных сплавов / Шанк Ф. М. // М.: Металлургия. -1973. – 760 с.

REFERENCES

1. Gorynin I.V., Karzov G.P., Filimonov G.N., Kozlov R.A., Tsukanov V.V. *Razrabotka i sovershenstvovanie konstruktivnykh materialov dly oborudovaniya novogo pokoleniya AES povyshennoy bezopasnosti I resursa* [Development and improvement of structural materials for equipment of a new generation of nuclear power plants with increased safety and life]. - Suchasne materialoznavstvo XXI storichya. - Kiev: Naukova dumka, 1998, p. 279-283 (in Russian).

2. Gubenko S.I., Oshkadev S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. – Kiev: Naukova dumka. 2016, 528 p. (in Russian).
3. Gubenko S.I., Bepalko V.N., Zhilenkova E.V., Balev A.E. *Issledovanie technologichskoy plastichnosti boristoy stali pri raznih rezhimakh deformatsii* [Investigation of the technological plasticity of boron steel under different deformation regimes]. - Building, materials science, machine building. Sat. sci. work. PDABA, v. 32, p. 1, Starodubov readinr 2005. – Dnepropetrovsk: PDABA, 2005, c. 231- 236. (in Russian).
4. Gubenko S.I., Bepalko V.N., Zhilenkova E.V. *Vliyanie temperature I stepeni deformatsii na character izmeneniya evtekticheskikh boridov v visokohromistoy stali s borom* [Effect of temperature and degree of deformation on the character of the change in eutectic borides in high-chromium steel with boron]. - Theory and practice of metallurgy, 2006., № 4-5, c.158-160. (in Russian).
5. Gubenko S.I., Bepalko V.N., Zhilenkova E.V. *Vliyanie razlichnih sposobov viplavki na kachstvo trubnih zagotovok iz visokohromistoy stali s borom* [Influence of various methods of smelting on the quality of billets from high chromium steel with boron]. Suchasni problem metalurgii. Plastic deformation of metals. Theory and manufacture of pipes. – Dnepr: NmetAU, 2008, p. 78-83 (in Russian).
6. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., 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 himija tverdogo tila - Physics and Chemistry of Solid State, 2008, v. 9, N1, p. 181-184 (in Ukrainian)
7. Bannih O.A., Driz M.E. *Diagrammy sostoyania dvoynih I troynih system na osnove zheleza* [Diagrams of the state of double and multicomponent systems based on iron. Directory.]. - Moscow: Metallurgy, 1986, 439 c. (in Russian).
8. Proidak Uy., Gubenko S., Bepalko V. Influence of Non-Metallic Inclusions on the Structural Heterogeneity of High-Alloy Steels. - Chestochowa University of Technology. Chestochowa, 2013, v.2, p. 128-134. (in English).
9. Tsotsko V.I., Denisenko A.I. Temperaturnie harakteristiki poverhnostnogo sloja nizkouglerodistih stalej v uslovijah lineinogo nagreva poverhnosti [Temperature characteristics of the surface layer of low-carbon steels in terms of a linear surface heating]. Visnik Dnepropetrovskogo nationalno universiteta – Messenger of Dnepropetrovst national university. 2004, №2: 72-77. (in Russian).
10. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. Denisenko A.I. Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruuschej obrabotki [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. Suchasni problem metalurgii. Naukovi pratsi - Modern problems of metallurgy. Proceedings.Dnepropetrovsk: Sistemnie Technologii, 2007, v. 10, p. 170-178. (in Russian).
11. Shank F. *Struktura dvoynih splavov* [Structure of double alloys]. - Moscow: Metallurgy, 1973, 760 c. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В.І. Большаковым (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Д.В. Лаухінім (Україна)