

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

УДК 669.1
МРНТИ 53.01.09

Ивченко А.В.¹, Перерва В.Я.², Зуев О.В.¹

¹ Украинский государственный университет науки и технологий, г. Днепр, Украина,
(ivchenkoaleksv@gmail.com)

² Национальный технический университет «Дніпровська політехніка», г. Днепр, Украина

Производство высокопрочного арматурного проката из низколегированных сталей модифицированных азотом

Проанализированы новые направления по реализации технологии модифицирования стали за счет выделения нанодисперсных избыточных эндофаз, как в процессе кристаллизации, так и при термомеханических воздействиях, образование которых позволяют управлять процессом формирования кристаллической структуры железоуглеродистых сплавов с целью получения продукции с повышенными потребительскими свойствами.

Акцентируется внимание на возможности получения арматурного проката соответствующего требованиям международных стандартов с оптимальным соотношением показателей прочности и пластичности путем реализации технологии карбонитридного упрочнения низколегированных конструкционных сталей.

Ключевые слова: прочность, арматурный прокат, конструкционная сталь, микролегирование, модифицирование, азотосодержащие модификаторы

Введение

Увеличение прочности конструкционной стали, применяемой при производстве арматурного проката для железобетонных конструкций, позволяет гарантировать их надежность и долговечность, а во многих случаях уменьшать сечение элементов конструкций и, соответственно, их массу [1,2].

Существует несколько направлений решения задачи уменьшения металлоемкости при сохранении надежности за счет повышения прочности, которые основываются на традиционных принципах термомеханического упрочнения в процессе горячей деформации, путем холодной деформации и твердорастворного упрочнения путем легирования стали элементами (Cr, Ni, Mo и др.) замещающими атомы железа в кристаллической решетке, искажение которой приводит к необходимости дополнительных затрат энергии на сдвиг дислокации по плоскости скольжения при приложении растягивающих нагрузок [3]. Однако эти направления с одной стороны связаны со сложностью получения свариваемых сегментов, а реализация второго решения значительно увеличивает стоимость арматурного проката из-за увеличения себестоимости при использовании дорогостоящих ферросплавов.

Современные тенденции повышения прочности и эксплуатационных характеристик стального проката и литья из низколегированных марок сталей предусматривает применение разнообразных схем модифицирования и микролегирования [4,5].

Несмотря на вековой опыт применения модификаторов с целью повышения прочностных и пластических свойств чугунного литья основанный на применении поверхностно активных элементов (Mg, Ca, B, Ba, и др.) незначительное содержание которых (0,003-0,01%) существенно изменяет микроструктуру и, как следствие повышает механические свойства [6,7,8], то направление модифицирования стали за счет выделения нанодисперсных избыточных фаз как в процессе кристаллизации так и при термомеханических воздействиях относительно новое и активно развивающееся [9].

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Предмет исследования

Реализация способов модифицирования низколегированных сталей основано на зарождении при кристаллизации в температурном интервале между линиями ликвидус и солидус наночастиц (15мкм - 200нм) избыточной фазы (рис.1,2), выполняющие роль инокуляторов, которые задерживают рост первичного аустенитного зерна в процессе затвердевания. Дальнейшее формирование конечной феррито-перлитной микроструктуры во внутризеренной аустенитной матрице определяет получение более дисперсных составляющих еще в литом состоянии.

Этот механизм реализуется при производстве сталей модифицированных азотом совместно с сильными нитридообразующими элементами (V, Nb, Ti, Al и др.). Наличие в стали нанодисперсных карбонитридов приводит к значительному измельчению зерна феррито-перлитной матрицы, что сопровождается повышению не только прочностных характеристик при увеличении показателей огнесохранности, но вязкости со снижением температурного порога хладноломкости.

Одной из основных причин, сдерживающих расширение производства низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением, является дефицит и очень высокая стоимость азотоносителей в качестве которых традиционно используют азотированные в твердом состоянии ферросплавы хрома, марганца, реже ванадия [10] либо материалы полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [11,12].

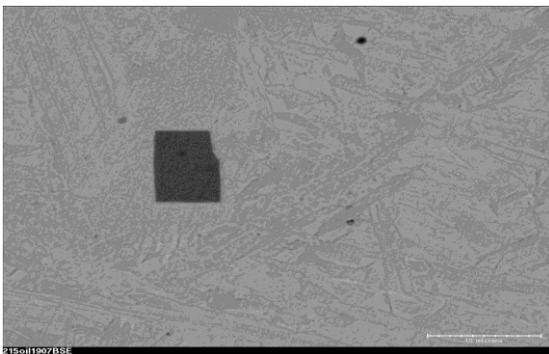
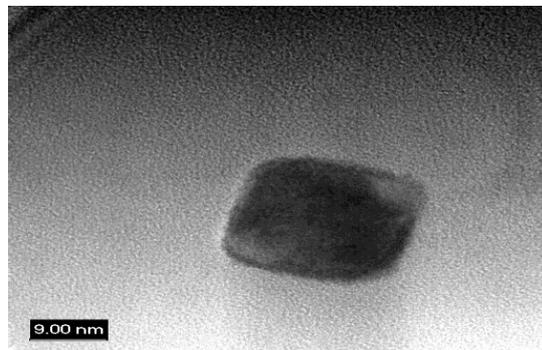
а) $\times 2500$ б) $\times 800000$

Рисунок 1 – Карбонитриды титана Ti(CN) в микроструктуре стали (размер 15-20 мкм)

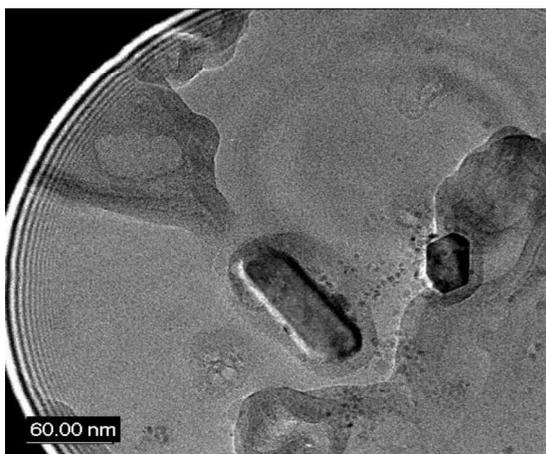
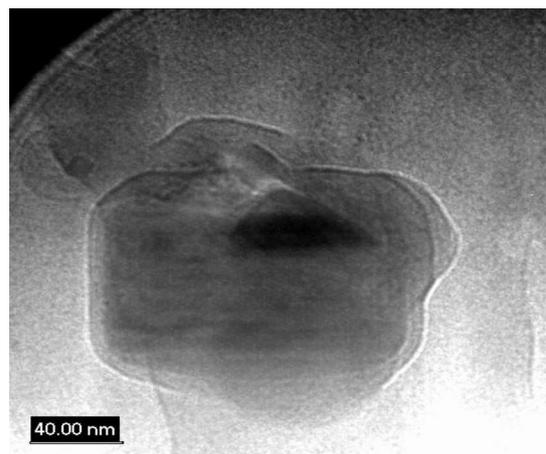
а) $\times 150000$ б) $\times 120000$

Рисунок 2 – Карбонитриды алюминия (а) и комплексные частицы Ti(C,N)+AlN (б) в микроструктуре стали (размер 40 - 200нм)

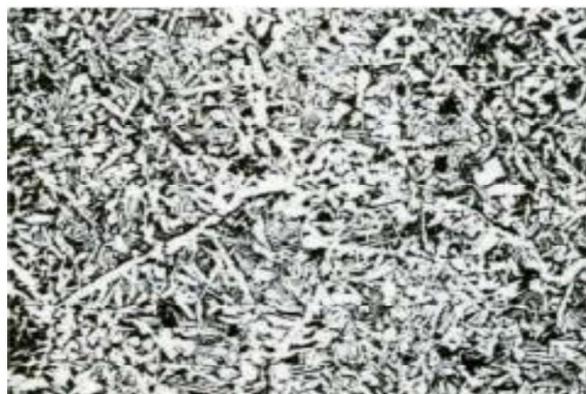
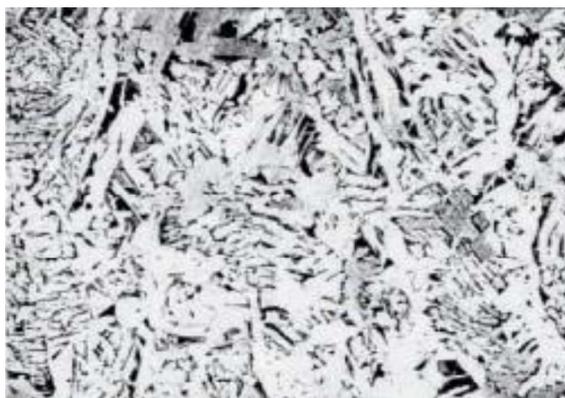
Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Методы легирования конструкционных сталей азотом непосредственно из газовой фазы продувкой в ковше требуют дополнительного оборудования и сменных расходуемых элементов (пористых пробок, керамических огнеупорных трубок), в то время как ограниченное распространение газоокислородного рафинирования (ГКР) в конвертерах с донной продувкой газовыми смесями переменного состава недоступны для массового производства углеродистых и низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением [13].

Получение новых эффективных азотсодержащих модификаторов с регулируемым, высоким и равномерным содержанием азота может быть осуществлено совместным жидкофазным окискованием порошковых ферросплавов практически любого состава (в том числе и отходов ферросплавного производства) и азотсодержащей составляющей при температуре обеспечивающей ее плавление без разложения, при этом последняя выполняет роль связки, обеспечивая тем самым способность смеси к формообразованию с получением прочного кускового материала необходимой фракции [9].

Современное состояние европейской строительной отрасли, в части возведение многоэтажных каркасных и монолитных железобетонных зданий и сооружений, основано на массовом применении арматурного проката класса прочности 500 МПа (A500C), объёмы производства которого постоянно увеличиваются. Основными поставщиками данной продукции в Европу являются Украина, Казахстан, Азейбаржан и др. При этом ввиду огромного количества предприятий, производящих арматурный прокат просматривается возрастающий уровень конкуренции на данную продукцию среди поставщиков. Поэтому лидирующее положение занимают те производители, продукция которых соответствует требованиям международных стандартов по характеристикам прочности и пластичности, а также имеет ряд дополнительных потребительских свойств – повышенную усталостную прочность, коррозионную стойкость, огнесохранность и огнестойкость. Обеспечение широкого набора потребительских свойств арматурного проката A500C возможно достичь путем правильного выбора технологии производства и применением сталей с карбонитридным упрочнением, содержащих ванадий и реже ниобий. Здесь следует отметить, что чрезмерное использование, упомянутых легирующих приводит к удорожанию продукции и делает ее неконкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынках. В этой связи более предпочтительно реализовать механизм карбонитридного упрочнения менее дорогостоящими элементами – азотом совместно с титаном и алюминием.

Разработанные способы карбонитридного упрочнения сталей путём модифицирования азотом (при его повышенном содержании в стали) согласуются с межгосударственным стандартом ГОСТ 34028 и требованиями на арматурный прокат ряда европейских стран: BS 4449 (Великобритания), ST 009 (Румыния), DM 14-9 (Италия), NF A35-080-1 (Франция), NEN 6008 (Нидерланды), NBN A 24-302 (Бельгия), БДС 9252 (Болгария), SS 212540 (Швеция), SFS 1300 (Финляндия), NS 3576-2 (Норвегия), где ужесточены требования к данной продукции для строительства и изготовления железобетонных конструкций. Достижение высоких показателей деформативности (пластичности) и усталостной прочности согласно норм европейского стандарта, не ограничивается не только повышением прочностных свойств готовой продукции до уровня 600 МПа, но предусматривает повышение хладостойкости, усталостной прочности и других показателей. Последние реально увеличить за счет формирования мелкозернистой структуры путем изменения морфологии неметаллических включений на основе нанодисперсных карбонитридных фаз (Рис.3). При этом такая продукция будет обладать повышенной сейсмостойкостью (усталостной прочностью), огнестойкостью, огнесохранностью и хладостойкостью при сохранении свариваемости.



Раздел 3. «Технические науки и технологии»

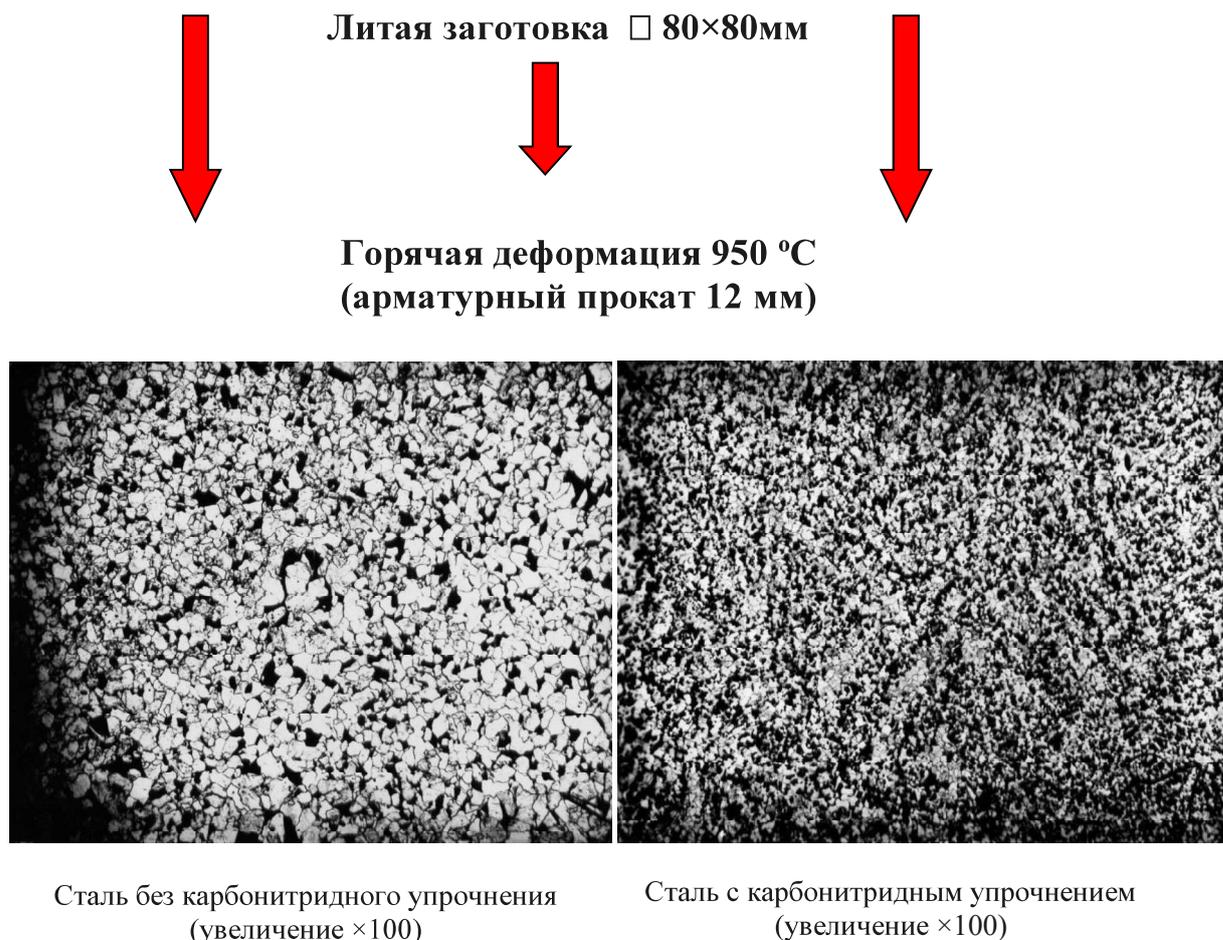


Рисунок 3 – Сравнительная микроструктура низколегированной стали марки ст.20

Реализация механизма карбонитридного упрочнения низколегированных сталей модифицированных азотом позволяет при производстве проката периодического профиля в сортаменте диаметром от 10 до 40 мм снизить содержание марганца и кремния в стали на 15-20% от базового состава сталей марок типа 18Г2С, 20ГС, 22С и др. При этом не применяется дорогостоящий ванадий и ниобий.

Выводы

Производство арматурного проката класса прочности 500-600 МПа из низколегированных сталей модифицированных азотом [14] существенно повышает потребительские свойства готовой продукции, такие, как выносливость, хладостойкость, сейсмостойкость, огнестойкость и огнесохранность, что обеспечит повышение надежности железобетонных конструкций и сооружений, особенно при строительстве в регионах с повышенной сейсмической активностью и большими перепадами температур окружающей среды.

Список использованных литератур

1. Ivchenko A.V. Improving the production of reinforcing bars of strength class 500-600 МПа with improved performance properties on the example of European standards / Ivchenko A.V., Zuiev O.V., Nurumgaliyev A.H., Yerzhanov A.S., Andryushkin A.V. //International scientific conference «Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union» : conference proceedings (September 6–7, 2023. Wloclawek, the Republic of Poland). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. 22-25 p.

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

2. Ivchenko A.V. Reinforcement Related for Construction in Seismic Active Regions. Aspects of Production, Application and Control. Aspects Min Miner Sci. 11(3). AMMS. 000762. 2023. DOI: 10.31031/AMMS.2023.11.000762
3. Бубликов Ю. А. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей феррито-перлитного класса // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 6. – №. 11 (72). – С. 50-58.
4. Большаков В. И., Узлов О. В., Дрожневская А. В., Пучиков М. О. Оптимизация химического состава и технологии выплавки стали 20Г2АФ // металознавство та термічна обробка металів – 2017. – с.10-15
5. Узлов, И. Г., Пучиков, А. В., Узлов, О. В., Рабинович, А. В., Трегубенко, Г. Н., Поляков, Г. А., Бубликов, Ю. А. Высокопрочная термически упрочненная микролегированная конструкционная сталь для вагоностроения // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. №2. – с. 51-54.
6. Гольдштейн Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М. : Металлургия, 1986. – 272 с.
7. Аубакиров Д.Р. Разработка и исследование технологии производства износостойких чугуновых отливок с использованием модификаторов: дис. доктора философии PhD: 8D07203 – Металлургия / Аубакиров Дастан Рахметоллаевич. – Караганда. 2022. – 141с.
8. Д. Н. Берчук, Л. А. Зеленая, В. А. Овсянников. Комплексное модифицирование высокопрочного чугуна // Литво. Металургія. 2018: Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції (22-24 травня 2018 р., м. Запоріжжя) – с.34-36.
9. Бубликов Ю.А., Ивченко А.В. Производство металлопродукции из сталей с карбонитридным упрочнением // LAMBERT Academic Publishing. Дюссельдорф. 2020. - 153 с.
10. <https://zxfecr.com/> Поставщик ферросплавов ZHEN XIN / © Anyang Zhenxin 2023
11. Знатдинов М.Х. Шатохин И.М. Перспективы производства и применения СВС-нитрида ферросилиция // Сталь. – 2008. №1. - с.26-31
12. Знатдинов М.Х. Шатохин И.М. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез азотированного феррохрома // Сталь. – 2009. №9. - с.48-53.
13. Ян Х. Розробка ресурсозберігаючої технології виробництва легованих азотом корозійностійких сталей методом газокисневого рафінування : автореферат дис. канд. техн. наук : 05.16.02 / Ян Хуй; Нац. металург. акад. України. - Д., 2010. - 24 с.
14. Заявка на патент KZ № 2023/0808.2 от 01.08.2023 г. Способ производства арматурного проката с повышенными эксплуатационными свойствами для железобетонных конструкций / Нурумгалиев А.Х., Ержанов А.С., Жунискалиев Т.Т., Куатбай Е.К., Ивченко А.В., Зуев О.В., Бубликов Ю.А., Перчун Г.И., Андриюшкин А.В.

Ивченко А.В., Перерва В.Я., Зуев О.В.

Азотпен модификацияланған төмен легирленген болаттардан жасалған жоғары беріктігі бар арматуралық прокат өндірісі

Кристалдану процесінде де, термомеханикалық әсерлерде де нанодисперсті артық эндофазаларды оқшаулау арқылы болатты модификациялау технологиясын іске асырудың жаңа бағыттары талданды, олардың түзілуі тұтынушылық қасиеттері жоғары өнім алу мақсатында темір-көміртекті қорытпалардың кристалдық құрылымын қалыптастыру процесін басқаруға мүмкіндік береді.

Төмен легирленген құрылымдық болаттарды карбонитридті қатайту технологиясын іске асыру арқылы беріктік пен икемділік көрсеткіштерінің оңтайлы арақатынасы бар халықаралық стандарттардың талаптарына сәйкес келетін арматуралық прокат алу мүмкіндігіне назар аударылды.

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Түйінді сөздер: беріктік, арматуралық илемдеу, құрылымдық болат, микролегирлеу, модификация, құрамында азот бар модификаторлар

Ivchenko A.V., Pererva V.Y., Zuev O.V.

Production of high-strength reinforcing steel from low-alloyed nitrogen-modified steels

The article analyses new directions on realisation of steel modification technology due to isolation of nano-dispersed excess endophases, both in the process of crystallization and in the case of thermomechanical influences, the formation of which allow to manage the process of formation of the crystal structure of iron-carbon alloys in order to obtain products with increased consumer properties.

Attention is paid to the possibility of obtaining reinforcing bars that meet the requirements of international standards with an optimal ratio of strength and plasticity by implementing the technology of carbonitride strengthening of low-alloyed structural steels.

Keywords: strength, reinforced steel, structural steel, microalloying, modification, nitrogen-containing modifiers

References

1. Ivchenko A.V. Improving the production of reinforcing bars of strength class 500-600 MPa with improved performance properties on the example of European standards / Ivchenko A.V., Zuev O.V., Nurumgaliyev A.H., Yerzhanov A.S., Andryushkin A.V. //International scientific conference "Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union" : conference proceedings (September 6-7, 2023. Wloclawek, the Republic of Poland). Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2023. 22-25 p.

2.

Ivchenko A.V. Reinforcement Related for Construction in Seismic Active Regions. Aspects of Production, Application and Control. Aspects Min Miner Sci. 11(3). AMMS. 000762. 2023. DOI: 10.31031/AMMS.2023.11.000762

3. Bublikov Yu. A. The main directions of improving the properties of structural steels of ferrite-perlite class //Eastern European Journal of Advanced Technologies. - 2014. – Vol. 6. – №. 11 (72). – Pp. 50-58.

4. Bolshakov V. I., Uzov O. V., Drozhevskaya A.V., Puchikov M. O. Optimization of the chemical composition and technology of 20G2AF steel smelting // metalloznavstvo ta termichna obrobka metalliv – 2017. – pp.10-15

5. Knots, I. G., Puchikov, A.V., Knots, O. V., Rabinovich, A.V., Tregubenko, G. N., Polyakov, G. A., Bublikov, Yu. A. High-strength thermally hardened microalloyed structural steel for wagon building //Metallurgical and mining industry. - 2013. No. 2. – pp. 51-54.

6. Goldstein Ya.E. Modification and microalloying of cast iron and steel / Ya.E. Goldstein, V.G. Mizin. – M. : Metallurgy, 1986. – 272 p.

7. Aubakirov D.R. Development and research of technology for the production of wear-resistant cast iron castings using modifiers: dis. Doctor of Philosophy PhD:

8D07203 – Metallurgy / Aubakirov Dastan Rakhmetollaevich. – Karaganda. 2022. – 141c.

8. D. N. Berchuk, L. A. Zelenaya, V. A. Ovsyannikov. Complex modification of high-strength cast iron // Litvo. Metallurgy. 2018: Materials of the XIV international scientific and practical conference (22-24 Travnaya, 2018, M. Zaporizhzhya) – pp.34-36.

9. Bublikov Yu.A., Ivchenko A.V. Production of metal products from carbonitride-hardened steels // LAMBERT Academic Publishing. Dusseldorf. 2020. - 153 p.

10. <https://zxfecr.com/> / ZHEN XIN Ferroalloy Supplier / © Anyang Zhenxin 2023

11. Znatdinov M.H. Shatokhin I.M. Prospects for the production and application of SHS-ferrosilicon nitride // Steel. – 2008. No.1. - pp.26-31

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

12. Znatdinov M.H. Shatokhin I.M. Self-propagating high-temperature synthesis of nitrated ferrochrome // Steel. - 2009. No.9. - pp.48-53.

13. Jan H. Rozrobka resursozberigayuchoy technology virobnitsva nitrogen-coated corrosion-resistant steels by gas-oxide refining : abstract of the dis. Candidate of Technical Sciences : 05.16.02 / Jan Huy; National metallurg. akad. Ukraine. - D., 2010. - 24 p.

14. Application for patent KZ No. 2023/0808.2 dated 08/01/2023. Method of production of reinforced rolled products with increased performance properties for reinforced concrete structures / Nurumgaliev A.H., Yerzhanov A.S., Juniskaliev T.T., Kuatbai E.K., Ivchenko A.V., Zuev O.V., Bublikov Yu.A., Perchun G.I., Andryushkin A.V.