

УДК 691.714

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ 20Г2АФ

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, *д. т. н, проф.*,  
УЗЛОВ О. В.<sup>2\*</sup>, *к. т. н., доц.*,  
ДРОЖЕВСКАЯ А. В.<sup>3</sup>, *ассист.*,  
ПУЧИКОВ М. О.<sup>4</sup>, *студ.*

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [oleg.uzlov@gmail.com](mailto:oleg.uzlov@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [ann.drozhevskaya@gmail.com](mailto:ann.drozhevskaya@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

<sup>4</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение “Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры”, ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [maksimaxxy@gmail.com](mailto:maksimaxy@gmail.com)

**Аннотация. Цель исследования.** Определить возможность оптимизации химического состава стали 20Г2АФ в пределах марочного состава с целью снижения расхода ферросплавов и повышения комплекса механических свойств проката. **Методика.** Исследование структурного состояния горячекатаного проката для крепи горных выработок осуществлялось с помощью световых микроскопов Neophot 32 и Axiovert 200M MAT с программным обеспечением AxioVision 4.6.3. Оценка величины зерна выполнялась по ГОСТ 5639 методом сравнения с эталонными шкалами, полосчатость – по ГОСТ 5640, неметаллические включения – по ГОСТ 1778. **Результаты.** Проведена оптимизация химического состава стали 20Г2АФ в пределах марочного состава. Разработаны рекомендации, позволяющие снизить расход азотсодержащих ферросплавов при выплавке стали 20Г2АФ. Получены данные о влиянии основных легирующих элементов стали 20Г2АФ на механические свойства проката. **Научная новизна.** Установлено, что при выплавке стали 20Г2АФ может быть достигнута существенная экономия азотсодержащих ферросплавов при одновременном повышении комплекса сдаточных механических характеристик готового проката. **Практическая значимость.** Разработанные рекомендации позволяют существенно снизить расход азотсодержащих ферросплавов на тонну выплавляемой стали типа 20Г2АФ. Таким образом, является возможным снизить себестоимость выплавки стали 20Г2АФ в промышленных условиях. При этом за счет повышения комплекса сдаточных механических характеристик шахтной крепи из стали 20Г2АФ представляется возможность проводить замену на более легкий профиль, что обеспечит существенную экономию металла и средств у конечного потребителя проката.

*Ключевые слова:* сталь типа 20Г2АФ; шахтная крепь; азотсодержащие ферросплавы; оптический микроскоп; нитриды ванадия

## ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СТАЛІ 20Г2АФ

БОЛЬШАКОВ В. І.<sup>1</sup>, *д. т. н, проф.*,  
УЗЛОВ О. В.<sup>2\*</sup>, *к. т. н., доц.*,  
ДРОЖЕВСЬКА Г. В.<sup>3</sup>, *асист.*,  
ПУЧИКОВ М. О.<sup>4</sup>, *студ.*

<sup>1</sup> Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [oleg.uzlov@gmail.com](mailto:oleg.uzlov@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

<sup>3</sup> Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [ann.drozhevskaya@gmail.com](mailto:ann.drozhevskaya@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

<sup>4</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [maksimaxxy@gmail.com](mailto:maksimaxxy@gmail.com)

**Анотація. Мета дослідження.** Визначити можливість оптимізації хімічного складу сталі 20Г2АФ в межах марочного складу з метою зниження витрати феросплавів і підвищення комплексу механічних властивостей прокату. **Методика.** Дослідження структурного стану гарячекатаного прокату для кріплення гірничих виробок здійснювалося за допомогою світлових мікроскопів Neophot 32 і Axiovert 200M MAT з програмним забезпеченням AxioVision 4.6.3. Оцінювання величини зерна виконувалося згідно з ГОСТ 5639 методом порівняння з еталонними шкалами, смужчатість – згідно з ГОСТ 5640, неметалеві включення – згідно з ГОСТ 1778. **Результати.** Проведено оптимізацію хімічного складу сталі 20Г2АФ в межах марочного складу. Розроблено рекомендації, що дозволяють знизити витрату азотомісних феросплавів під час виплавки сталі 20Г2АФ. Отримано дані про вплив основних легуючих елементів сталі 20Г2АФ на механічні властивості прокату. **Наукова новизна.** Встановлено, що у процесі виплавки сталі 20Г2АФ може бути досягнута істотна економія азотомісних феросплавів за одночасного підвищення комплексу нормованих механічних характеристик готового прокату. **Практична значимість.** Розроблені рекомендації дозволяють істотно знизити витрату азотомісних феросплавів на тонну виплавленої сталі типу 20Г2АФ. Таким чином, можливо знизити собівартість виплавки сталі 20Г2АФ в промислових умовах. При цьому за рахунок підвищення комплексу нормованих механічних характеристик шахтного кріплення із сталі 20Г2АФ можна проводити заміну на більш легкий профіль, що забезпечить істотну економію металу і коштів у кінцевого споживача прокату.

*Ключові слова:* сталь типу 20Г2АФ; шахтне кріплення; азотомісні феросплави; оптичний мікроскоп; нітриди ванадію

## OPTIMIZATION OF CHEMICAL COMPOSITION AND MELTING TECHNOLOGY OF 20Г2АФ STEEL

BOLSHAKOV V.I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
UZLOV O.V.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ph. D., Ass. Prof.*,  
DROZHEVSKA H.V.<sup>3</sup>, *assistant*,  
PUCHYKOV M.A.<sup>4</sup>, *student*

<sup>1</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [bolshakov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bolshakov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [oleg.uzlov@gmail.com](mailto:oleg.uzlov@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

<sup>3</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [ann.drozhevskaya@gmail.com](mailto:ann.drozhevskaya@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

<sup>4</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: [maksimaxxy@gmail.com](mailto:maksimaxxy@gmail.com)

**Abstract. Purpose of the study.** To determine the possibility of optimizing the chemical composition of 20Г2АФ steel within the range of standardized composition in order to reduce the consumption of ferroalloys and to increase the complex of mechanical properties of rolled products. **Methodology.** Investigation of the structural state of hot-rolled steel for the mine workings shore up was carried out using light microscopes Neophot 32 and Axiovert 200M MAT with AxioVision 4.6.3 software. The grain size was assessed in accordance with GOST 5639 by comparison with reference scales, stripes - according to GOST 5640, non-metallic inclusions - according to GOST 1778. **Results.** The optimization of the chemical composition of 20Г2АФ steel within the range of standardized composition was carried out. Recommendations have been developed that allow reducing the consumption of nitrogen-containing ferroalloys at the melting process of 20Г2АФ steel. Provided data on the influence of the basic alloying elements of 20Г2АФ steel on the mechanical properties of rolled products. **Scientific novelty.** It was found that at the melting process of 20Г2АФ steel the substantial saving in nitrogen-containing ferroalloys can be achieved while increasing the standardized mechanical characteristics of finished rolled products. **Practical significance.** The developed recommendations allow to significantly reduce the consumption of nitrogen-containing ferroalloys per ton of 20Г2АФ steel. Thus, it is possible to reduce the cost price of steelmaking of 20Г2АФ steel in industrial conditions. At the same time, due to the increasing the set of standardized mechanical characteristics of the mine workings shore up produced from 20Г2АФ steel, it is possible to replace it with a lighter by weight profile. This will ensure a substantial saving of metal and funds for the end-user of rolled products.

*Keywords:* 20Г2АФ type steel; mine workings shore up; nitrogen containing ferroalloys; optical microscope; vanadium nitrides

### Постановка проблеми

Как известно, профили горячекатаные для крепи горных выработок типа СВП производятся по ГОСТ 18662. Существующий сортаментный ряд включает профили СВП 14, СВП17, СВП19, СВП22, СВП27 и СВП33. Цифровое обозначение в номере профиля соответствует его линейной плотности, т. е. весу погонного метра.

Крепь для горных выработок изготавливается на рудоремонтных заводах способом холодной гибки в основном в виде трехзвенных арочных конструкций с замковыми соединениями. Работает при нагрузках в области упругой деформации материала, допускается частичная потеря формы крепи и последующее её восстановление холодной правкой деформированных участков. В процессе производства и эксплуатации крепи тепловое воздействие (сварка) не применяется, что определяет отсутствие ограничений по углеродному эквиваленту.

Основными требованиями к прокату для крепи горных выработок являются:

- стабильность и равномерность внутримарочного и внутривидового химического состава стали и, соответственно, прочностных характеристик по длине раскатов;

- обеспечение геометрических параметров профиля.

Шахтная крепь является единственным известным профилем, для которого предусмотрена система взаимозаменяемости. Вышеприведенный сортаментный ряд по ГОСТ 18662 рассчитан исходя из величины предела текучести не менее 285 Н/мм<sup>2</sup>. Первый уровень взаимозаменяемости в пределах существующего сортаментного ряда реализуется при величине предела текучести проката не менее 440 Н/мм<sup>2</sup>. При этом более лёгкий высокопрочный профиль меняет соседний по ряду обычной прочности, например, СВП22 класса прочности 440 меняет СВП27 класса 285 и т. д. Экономия металла составляет около 20 %, или отпадает необходимость в освоении одного более тяжелого профиля. Производство и применение такого проката достаточно распространено в промышленных условиях.

Второй уровень взаимозаменяемости обеспечивается при величине предела текучести проката не менее 590 Н/мм<sup>2</sup> с заменой второго в ряду более тяжелого профиля, например, СВП22 класса 590 заменяет СВП33 класса 285 и т. д. Экономия металла при этом до 40 % или отпадает необходимость в освоении двух более тяжелых профилей. Второй уровень взаимозаменяемости в промышленных условиях до настоящего времени не реализован, так же, как и эффективное использование проката промежуточных классов прочности, например, 350, 500 и/или др.

Материалом для профилей шахтной крепи с пределом текучести не менее 285 являются стали Ст5пс и Ст5сп по ДСТУ 2651:2005/ГОСТ380-2005. Содержание углерода 0,28...0,37 %, марганца

0,5...0,8 %, кремния 0,05...0,15 % (Ст5пс) и 0,15...0,30 % (Ст5сп). Высокопрочная шахтная крепь с пределом текучести не менее 440 Н/мм<sup>2</sup> производится из полуспокойной стали 20Г2АФпс по ТУ 14-1-2493-2007 с содержанием кремния до 0,17 % и спокойной стали 20Г2АФ по ТУ У 24.1-00185790-110:2014. Достаточно высокая себестоимость малоуглеродистой марганцовистой стали 20Г2АФ с карбонитридванадиевым упрочнением определяется необходимостью использования дорогостоящих ванадий- и азотсодержащих ферросплавов, а также низким и нестабильным усвоением азота при её производстве.

Таким образом, весьма важной народно-хозяйственной задачей является снижение себестоимости стали 20Г2АФ за счёт повышения и стабилизации усвоения азота с уменьшением норм расходов азотированных ферросплавов.

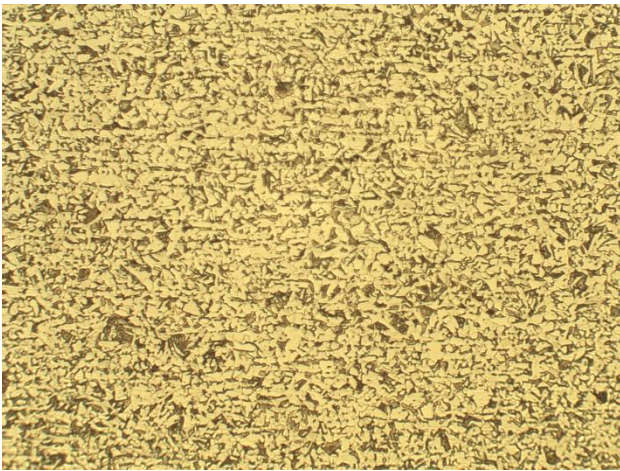
### Результаты исследований

В промышленности широко применяются стали с системой легирования V–N. В последнее время также разработаны стали с системой легирования Al – Ti – N [1–4]. Общим для этих систем легирования является использование азота в качестве легирующего элемента. Это позволяет добиться выдающихся свойств готового продукта и получить в стали новые структурные состояния [3; 4]. В то же время введение азота в жидкую сталь связано с рядом технологических особенностей. Основной проблемой является низкий коэффициент усвоения азота жидкой сталью.

Проведенные технологические мероприятия позволили повысить коэффициент усвоения азота жидкой сталью почти в 2 раза. Это привело к существенному снижению расхода дорогостоящих азотсодержащих ферросплавов и оптимизации технологического процесса выплавки стали. Влияние оптимизации химического состава стали 20Г2АФ в пределах марочного и технологии выплавки этой стали на комплекс сдаточных характеристик крепи горных выработок рассмотрено далее.

Исследование структурного состояния горячекатаного проката для крепи горных выработок осуществлялось с помощью световых микроскопов Neophot 32 и Axiovert 200M MAT с программным обеспечением AxioVision 4.6.3. Оценка величины зерна выполнялась по ГОСТ 5639 методом сравнения с эталонными шкалами, полосчатость – по ГОСТ 5640, неметаллические включения – по ГОСТ 1778.

Общая микроструктура профиля СВП представлена на рисунке 1. Карбонитриды ванадия в виде мелких включений белого цвета с бледно-розовым оттенком (рис. 2) выделяются преимущественно на границах ферритных зёрен и перлитных колоний. В тёмнопольном изображении частицы непрозрачны, окаймлены по границе светящейся линией (рис. 2).



*a* ×100

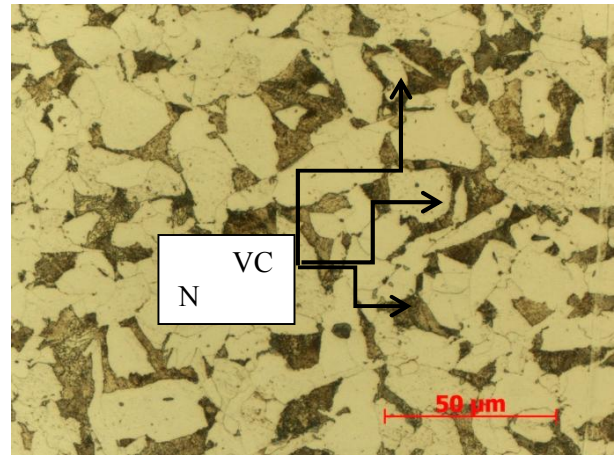


*b* (b) ×400

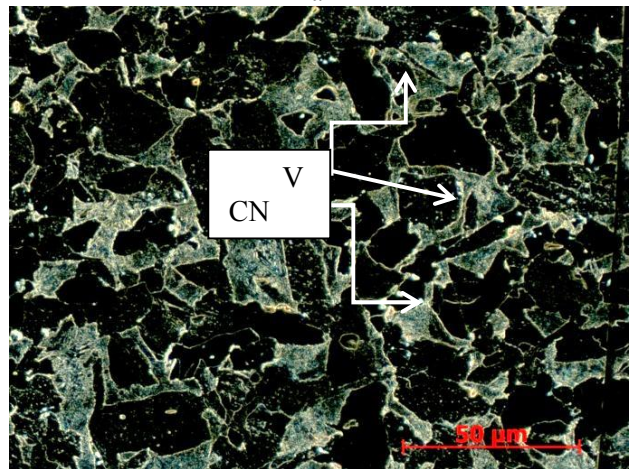
Рис. 1. Микроструктура профіля СВП 27 из стали марки 20Г2АФ / Fig. 1. Microstructure of the SVP 27 profile from steel grade 20G2AF

В целом структура горячекатаной шахтной крепи традиционная ферритно-перлитная с характерными карбонитридными включениями. Дисперсность структуры соответствует 8–9-му баллу и несколько отличается по сечению проката, что видимо определяется различной степенью деформации по элементам профіля. Выявленные мелкие сульфидные (балл 0,5–1,5б), точечные оксидные (балл 1,0–2,0) включения, а также отдельные газовые пузыри скорее всего не окажут существенного влияния на комплекс сдаточных характеристик готового проката.

Оценка влияния оптимизации химического состава стали 20Г2АФ по содержанию углерода, ванадия, азота на сдаточные характеристики проката опытных партий представлена на рисунке 3.

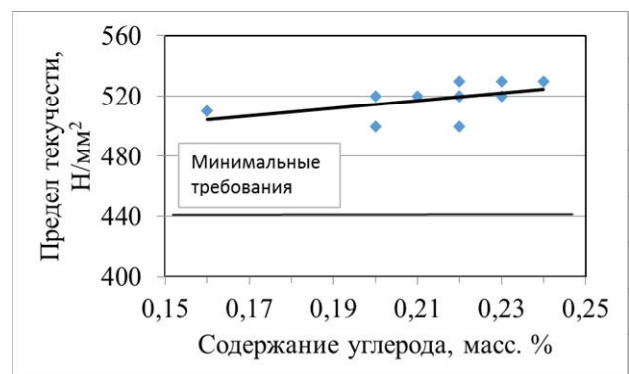


*a*

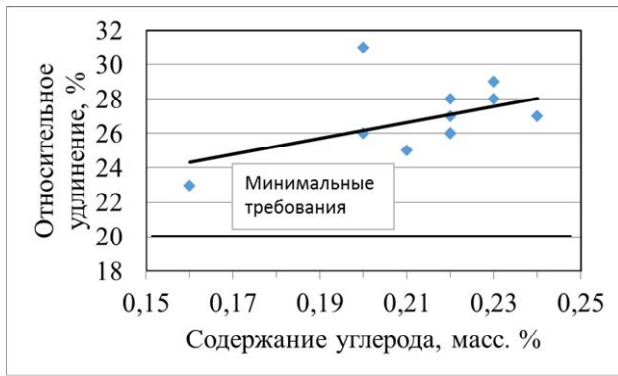


*b* (b)

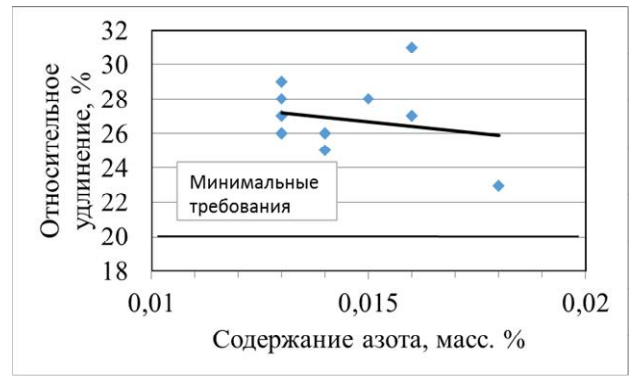
Рис. 2. Микроструктура дніща профіля горячекатаного СВП 27 из стали 20Г2АФ в светлом (а) и темном (б) поле зрения / Fig 2. Microstructure of the bottom of the profile of hot rolled SVP 27 from steel 20G2AF in light (a) and dark (b) field of view



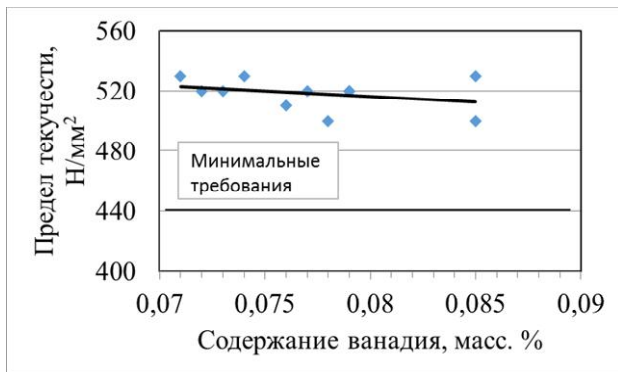
*a*



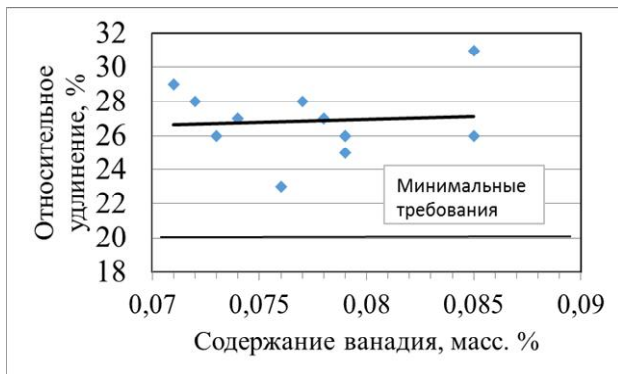
б (b)



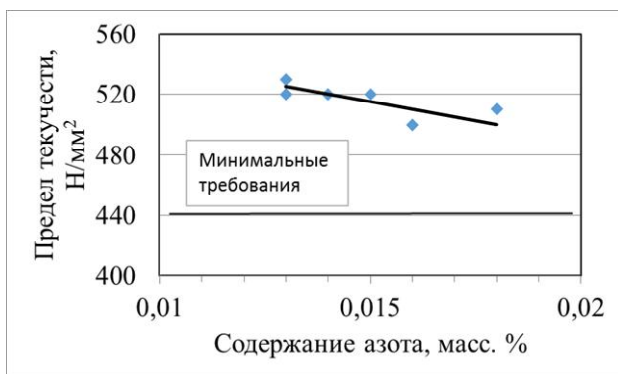
е (f)



в (c)



г (d)



д (e)

Рис. 3. Зависимость основных сдаточных характеристик проката СВП27 из стали 20Г2АФ от колебания в пределах марочного содержания основных легирующих элементов (а–е) /  
Fig. 3. Dependence of the basic delivery characteristics of rolled SVP27 from steel 20Г2АФ from fluctuations within the limits of the branded content of the main alloying elements (a–f)

На основании анализа рисунка 3 можно сделать следующие выводы:

- повышение содержания углерода до 0,20...0,24 закономерно повышает прочностные характеристики проката;
- повышение содержания ванадия в пределах марочного негативно влияет на прочностные характеристики проката СВП;
- повышение содержания азота также оказывает негативное влияние на прочностные характеристики проката, что создаёт предпосылки для его дальнейшего снижения ниже 0,013 %;
- влияние рассматриваемых химических элементов (углерод, ванадий, азот) на пластичность стали как наиболее структурно чувствительную характеристику неоднозначно, что определяет необходимость проведения дополнительных микроструктурных исследований на большем объёме плавок, с привлечением средств электронной микроскопии.

### Выводы

1. Оптимизация химического состава стали 20Г2АФ и технологии ввода феррованадия азотированного марки NITROVAN VANADIUM 16 позволили добиться существенного снижения расхода азотсодержащих ферросплавов.
2. Химический состав стали и мелкодисперсная ферритно-перлитная структура горячекатаного проката обеспечивают уровень сдаточных характеристик профилей СВП, соответствующий требованиям ТУ У 24.1-00185790-110-2014.
3. Реализованные технические мероприятия обеспечивают возможность дальнейшего снижения себестоимости производства проката СВП из стали 20Г2АФ.

4. Полученный после оптимизации высокий уровень сдаточных характеристик шахтной крепи из стали 20Г2АФ позволяет реализовать существенную экономию металла в условиях конечного потребителя проката.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Большаков В. И. Термическая обработка экономно легированных конструкционных сталей как возможность получения недорогого проката / В. И. Большаков, О. В. Узлов, Ю. А. Ключник, Д. С. Зотов, Л. В. Узлова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2006. – № 2. – С. 27–31.
2. Узлов И. Г. Высокопрочная термически упрочненная микролегированная конструкционная сталь для вагоностроения / И. Г. Узлов, А. В. Пучиков, О. В. Узлов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 51–54. – Режим доступа : <http://www.metaljournal.com.ua/metal-gp2-2013/>
3. Uzlov O. V. Investigation of acicular ferrite structure and properties of C – Mn – Al – Ti – N steels / O.V. Uzlov, A. Malchere, V.I. Bolshakov, C. Esnouf // *Advanced Materials Research*. – Switzerland : Trans Tech Publ., 2007. – Vol. 23. – Pp. 209–212. – Режим доступа : <http://www.scientific.net/AMR.23.209>
4. Большаков В. И. Роль нитридов алюминия и карбонитридов титана при получении структуры игольчатого феррита в низколегированных конструкционных сталях / В. И. Большаков, О. В. Узлов, А. В. Пучиков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 2. – С. 59–62. – Режим доступа : <http://www.metaljournal.com.ua/mgp-02-2005/>

#### REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Uzlov O.V., Klushnik U.A., Zotov D.S. and Uzlova L.V. *Termicheskaya obrabotka ekonomno legirovannykh konstruktsionnykh staley kak vozmozhnost polucheniya nedorogogo prokata* [Heat treatment sparingly alloyed construction steels as the possibility of obtaining low-cost rolled metal]. *Metallorazvedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 2006, no. 2, pp. 27–31. (in Russian).
2. Uzlov I.G., Puchikov A.V. and Uzlov O.V. *Visokoprochnaya termicheski uprochnennaya konstruyktsionnaya stal dlia vagonostroeniya* [High-strength hardened microalloyed structural steel for car building]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2013, no. 2, pp. 51–54. (in Russian).
3. Uzlov O.V., Malchere A., Bolshakov V.I. and Esnouf C. Investigation of acicular ferrite structure and properties of C–Mn–Al–Ti–N steels. *Advanced Materials Research*. Switzerland: Trans Tech Publ., 2007, vol. 23, pp. 209–212.
4. Bolshakov V.I., Uzlov O.V. and Puchikov A.V. *Rol nitridov alyuminiya i karbonitridov titana pri poluchenii struktury igolchatogo ferrita v nizkolegirovannykh konstruyktsionnykh stalyakh* [The role of aluminum nitride and titanium carbonitride in obtaining acicular ferrite structure in a low-alloy structural steels]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2005, no. 2, pp. 59–62. (in Russian).

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, профессором В. И. Большаковым (Украина); д-ром техн. наук, профессором В. С. Вахрушевой (Украина).*

Поступила в редколлегию 10.11.2017

Принята к печати 22.11.2017