

опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці . – 2012. – № 1. – С. 143.

**11. Сучков, Д.И.** Медь и ее сплавы / Д.И. Сучков. – М.: Металлургия, 1967.– 248 с.

**12. Двойные** и многокомпонентные системы на основе меди. Справочник / М.Е. Дриц [и др.]. – М.: Наука, 1979. – 248 с.

**13. Порошковые** материалы на основе железа и меди. Атлас структур / П.А. Витязь [и др.]. – Минск. Белорус. наука, 2008. – 155 с.

**14. Гуляев, А.П.** Материаловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

**15. Лахтин, Ю.М.** Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

**16. Schumann, Hermann:** Metallographie / von Herman Schumann unter mitarb. von Klaus Cyrener...13., neubearb. Aufl. – Leipzig : Dt . Verl. für Grundstoffindustrie, Cop. 1991. – 764 с.

*УДК 621.762*

**В.Г. ЩЕРБАКОВ (БНТУ)**

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОПЛАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В ДИФфуЗИОННО- ЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВАХ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ**

**Введение.** Диффузионно-легируемые (ДЛ) сплавы из металлических отходов производства в виде стружки, дроби, сечки и др. для упрочнения и восстановления деталей машин разработаны и широко распространены благодаря работам авторов [1–6]. Диффузионно-легируемые сплавы являются перспективной заменой наплавочных сплавов на никелевой и железной основе, разработанных более 50 лет назад. Эти сплавы обладают высокой стоимостью, и эксплуатационные свойства получаемых покрытий на их основе часто являются нецелесообразными при упрочнении деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания.

Ограниченное применение ДЛ сплавов для индукционной наплавки токами высокой частоты (ТВЧ) обуславливается высокой температурой плавления данных сплавов. Наличие тугоплавкой боридной оболочки  $Fe_2B$  и  $FeB$  с температурами плавления  $1389\text{ }^{\circ}C$  и  $1540\text{ }^{\circ}C$  [7] соответственно, ухудшает технологические свойства наплавочного сплава. Автором ранее исследованы некоторые пути снижения температуры плавления диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства [8–12]. Установлено, что одним из перспективных методов снижения температуры плавления ДЛ сплавов для наплавки ТВЧ является предварительная кратковременная высокотемпературная обработка (КВТО) (оплавление). Исследован и описан возможный механизм контактного эвтектического плавления в ДЛ сплавах при оплавлении [13], проведена оценка целесообразности использования различного оборудования при оплавлении ДЛ сплавов и разработано и изготовлено оригинальное оборудование для предварительной кратковременной высокотемпературной обработки ДЛ сплавов [14]. В настоящий момент доказана перспективность использования ДЛ сплавов из металлических отходов производства для упрочнения и восстановления деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Однако отсутствуют данные влияния количества образовавшихся эвтектических структур в ДЛ сплавах после оплавления на снижение температуры плавления сплава и продолжительности формирования износостойких покрытий наплавкой ТВЧ. Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния режимов предварительного оплавления ДЛ сплавов на количество образующихся эвтектических структур в сплавах, температуру плавления сплава и продолжительность процесса наплавки.

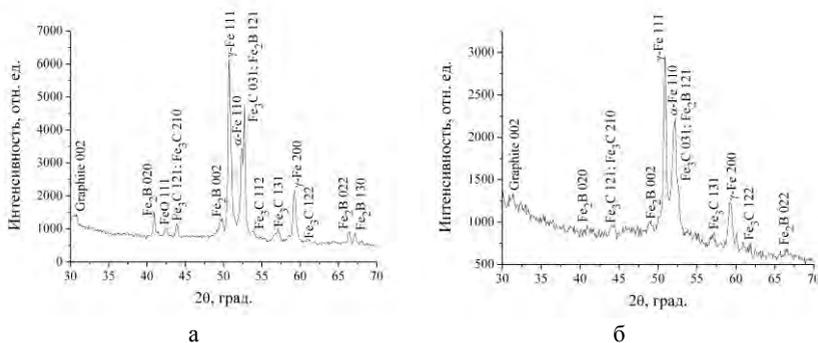
**Материалы и оборудование для исследований.** Для исследований были выбраны металлические отходы чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 фракцией 0,5–0,63 мм, образующиеся на промышленных предприятиях после дробеструйной и электроэрозионной обработки. Химический состав материалов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых металлических отходов производства

Материал	Концентрация элементов, % масс							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	S	P
ДЧЛ 08	3,25	0,44	0,361	0,189	0,122	осн.	0,067	0,036
ИЧХ28Н2	2,8–3,0	0,5–1,5	1,0	25,0–30,0	1,0–3,0	осн.	0,08	0,1

Диффузионное легирование (борирование) осуществлялось в специально разработанных электрических печах с вращающимся одним либо несколькими контейнерами из нержавеющей стали [15]. Температура процесса составляла 950 °С, время выдержки – 1 ч. Последующий рассев насыщающей смеси и насыщаемого материала осуществлялся с помощью сит либо с использованием магнитного сепаратора. В качестве насыщающего компонента использовали карбид бора с добавкой 1 % активатора. Наплавку ТВЧ проводили на установке ФТИ-40/10-50 [16]. Контроль температуры осуществлялся визуальным наблюдением и с помощью пирометра «Comrast» STLaser-2МН-CF4. Подготовка образцов из ДЛ сплавов и покрытий на их основе осуществлялась согласно стандартным методам и методикам. Анализ микроструктуры проводили на микроскопах Leica P2500P и VEGA II при различных увеличениях. Кратковременную высокотемпературную обработку (оплавление) проводили на экспериментальной установке с двумя графитовыми электродами [17]. В качестве источника питания использовался сварочный выпрямитель ВД-306. Оплавление ДЛ сплавов осуществлялось с различной силой тока на сварочном выпрямителе и равнялось 50, 70, 100, 150 и 200 А.

**Обсуждение результатов исследований.** Так как после кратковременной высокотемпературной обработки (КВТО) в ДЛ сплавах формируются мелкодисперсные структуры, имеющие сложный фазовый состав (рисунок 1), данные рентгеноструктурного анализа могут быть неполными и количественную оценку образования эвтектических структур в ДЛ сплавах можно проводить с помощью микродюроспектрального анализа [18].



а – ДЛ сплав из чугунной дроби ДЧЛ 08;  
 б – ДЛ сплав из чугунной дроби ИЧХ28Н2

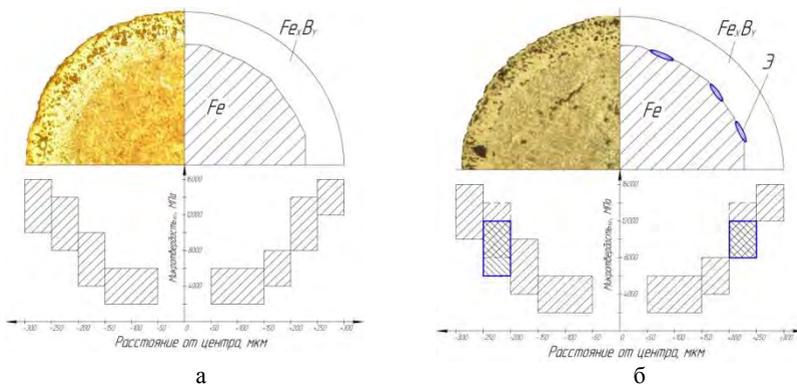
Рисунок 1 – Рентгенограмма ДЛ сплавов после КВТО

Известно, что микротвердость высокобористой фазы FeV составляет 1850–1950 HV, микротвердость низкобористой фазы Fe<sub>2</sub>B – 1505–1680 HV, а микротвердость эвтектики, состоящей из α-твердого раствора на основе железа и фазы Fe<sub>2</sub>B – 440–580 HV [7]. Исследовав изменение микротвердости по сечению ДЛ сплава до и после оплавления с различной силой тока сварочного выпрямителя при формировании электрической дуги между графитовыми электродами, можно достаточно точно судить о концентрации образованной после оплавления эвтектической составляющей в сплаве. На рисунках 2–4 представлены совмещенные иллюстрации, состоящие из реальной микроструктуры ДЛ сплава, распределения микротвердости по сечению и схемы образования эвтектических структур в сплаве после оплавления.

При оплавлении с силой тока на выпрямителе равным 50 А изменение микротвердости по сечению сплава зафиксировано на расстоянии 200–250 мкм от центра дроби. Микротвердость сплава до оплавления на данном расстоянии составляла 8000–14000 МПа, а после оплавления снизилась до 6000–12000 МПа. Общее снижение микротвердости сплава составило 15–25 % (рисунок 2, б).

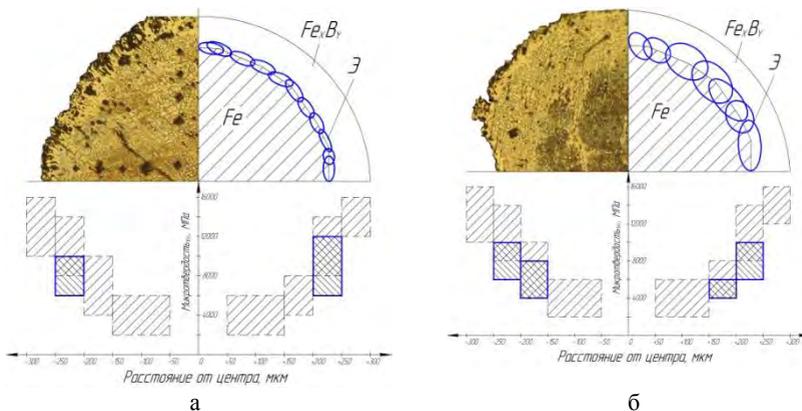
При оплавлении с силой тока на выпрямителе 70 А микротвердость по сечению сплава снизилась также лишь на расстоянии 200–250 мкм. Микротвердость сплава до оплавления на данном расстоянии составляла 8000–14000 МПа, а после оплавления снизилась

до 6000–10000 МПа. Общее снижение микротвердости на данном расстоянии от центра сплава составило 19–25 % (рисунок 3, а).



а – исходный ДЛ сплав на основе чугуновой дроби;  
 б – ДЛ сплав после КВТО при 50 А

Рисунок 2 – Совмещенная схема структурообразования в ДЛ сплавах при оплавлении

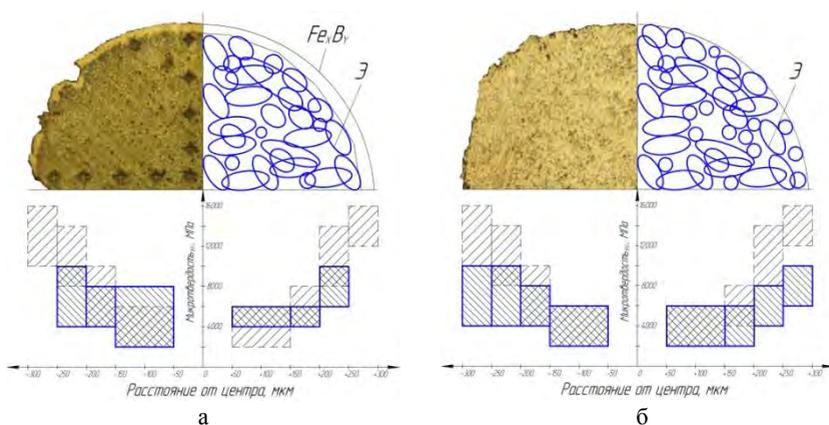


а – ДЛ сплав после КВТО при 70 А; б – ДЛ сплав после КВТО при 100 А

Рисунок 3 – Совмещенная схема структурообразования в ДЛ сплавах при оплавлении

Оплавление с силой тока равной 100 А (рисунок 3, б) изменяет микротвердость по сечению сплава уже на двух участках с расстоя-

нием 150–200 мкм и 200–250 мкм. Микротвердость сплава до оплавления на участке 150–200 мкм составляла 4000–10000 МПа, а после оплавления снизилась до 4000–8000 МПа. Снижение микротвердости на данном участке сплава составляет до 20 %. Микротвердость сплава до оплавления на участке 200–250 мкм составляла 8000–14000 МПа, а после оплавления снизилась до 6000–10000 МПа. Общее снижение микротвердости на данном участке составляет 19–25 %.



а – ДЛ сплав после КВТО при 150 А; б – ДЛ сплав после КВТО при 200 А

Рисунок 4 – Совмещенная схема структурообразования в ДЛ сплавах при оплавлении

КВТО с силой тока равной 150 А (рисунок 4, а) влияет на изменение микротвердости по сечению сплава уже на четырех участках с расстоянием 50–100 мкм, 100–150 мкм, 150–200 мкм и 200–250 мкм. Микротвердость сплава до оплавления на участке 50–100 мкм составляла 2000–4000 МПа, а после оплавления возросла до 4000–6000 МПа. Общий рост микротвердости на данном участке составил 20 %. Микротвердость сплава до оплавления на участке 100–150 мкм составляла 2000–4000 МПа, а после оплавления возросла до 4000–8000 МПа. Рост микротвердости на данном участке сплава составил 33–50 %. Микротвердость сплава до оплавления на участке 150–200 мкм составляла 4000–10000 МПа, а после оплавления снизилась до 4000–8000 МПа. Общее снижение микро-

твердости на данном участке сплава достигает 20 %. Микротвердость сплава до оплавления на участке 200–250 мкм составляла 8000–14000 МПа, а после оплавления снизилась до 4000–10000 МПа. Общее снижение микротвердости на данном участке сплава составило 19–50 %.

При оплавлении ДЛ сплава с силой тока 200 А (рисунок 4, б) рост микротвердости по сечению на участке 50–100 мкм составил 30 %, а на участке 100–150 мкм – 33–50 %. Микротвердость сплава до оплавления на участке 150–200 мкм составляла 4000–10000 МПа, а после оплавления снизилась до 4000–8000 МПа, при этом общее снижение микротвердости составило до 20 %. На участке 200–250 мкм микротвердость сплава до оплавления составляла 8000–14000 МПа, а после оплавления снизилась до 4000–8000 МПа, при этом общее снижение микротвердости составило 43–50 %. На участке 250–300 мкм микротвердость сплава до оплавления составляла 12000–16000 МПа, а после оплавления снизилась до 6000–10000 МПа, общее снижение микротвердости составило 38–50 %.

Влияние силы тока при оплавлении на снижение микротвердости ДЛ сплава представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение микротвердости от силы тока при оплавлении

Изменение микротвердости (%) от исходного ДЛ сплава при оплавлении					
Ток, А	Расстояние от центра к краю, мкм				
	50–100	100–150	150–200	200–250	250–300
50	–	–	–	↓15–20	–
70	–	–	–	↓19–25	–
100	–	–	↓до 20	↓19–25	–
150	↑до 20	↑33–50	↓до 20	↓19–50	–
200	↑до 30	↑33–50	↓до 20	↓43–50	↓38–50

На основании изменения микроструктуры, микротвердости и химического состава проведена количественная оценка концентрации эвтектической составляющей в ДЛ сплаве после оплавления (таблица 3).

Таблица 3 – Количество эвтектической составляющей в ДЛ сплаве после оплавления

Режим	Ток, А	Фазовый состав сплава	% эвтектики, об.
1	50	$Fe_2B + \Xi(\alpha\text{-тв.р-р}+Fe_2B)$	5–10
2	70	$Fe_2B + \Xi(\alpha\text{-тв.р-р}+Fe_2B)$	15–20
3	100	$Fe_2B + \Xi(\alpha\text{-тв.р-р}+Fe_2B)$	30–40
4	150	$Fe_2B + \Xi(\alpha\text{-тв.р-р}+Fe_2B)$	60–70
5	200	$\Xi(\alpha\text{-тв.р-р}+Fe_2B)$	90–100

Оценка влияния количества эвтектической составляющей в ДЛ сплаве на время образования жидкой ванны при наплавке ТВЧ осуществлялась с использованием одинаковых пластин из стали 45 и установки для наплавки ТВЧ ФТИ-40/10-50. Фиксировалась продолжительность работы установки с момента включения до образования участков жидкого расплава на поверхности стальной пластинки. Образование жидкой ванны расплава фиксировалось визуально. Установлено, что с повышением количества эвтектических структур в ДЛ сплаве после оплавления снижается продолжительность интервала образования жидкой ванны расплава (таблица 4).

Таблица 4 – Продолжительность наплавки ТВЧ ДЛ сплава после КВТО

Режим	Ток, А	% эвт., об	Время обр. жидкого сплава, с
0	0	0	60–65
1	50	5–10	50–55
2	70	15–20	45–50
3	100	30–40	35–40
4	150	60–70	30–35
5	200	90–100	20–25

Исследовав микроструктуру, распределение микротвердости и изменение химического состава ДЛ сплава при предварительной КВТО и изучив влияние количества эвтектической составляющей в ДЛ сплаве на скорость формирования жидкой ванны при наплавке ТВЧ, предложены рациональные режимы комплексной обработки ДЛ сплавов для формирования защитных покрытий наплавкой ТВЧ (рисунок 5).

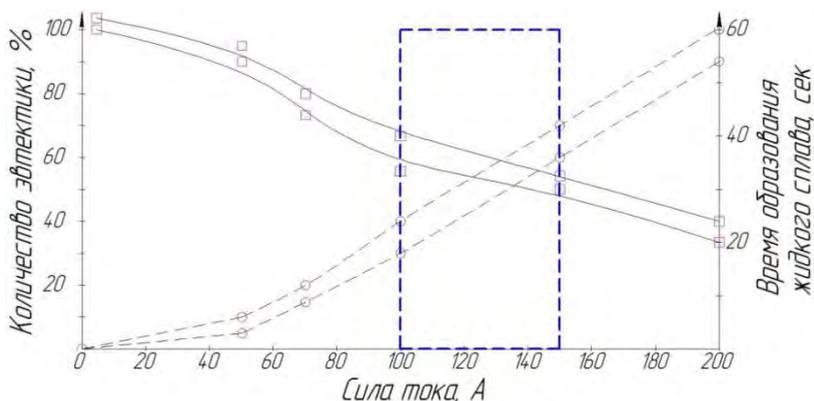


Рисунок 5 – Рекомендованные условия комплексной обработки ДЛ сплавов для формирования защитных покрытий наплавкой ТВЧ

**Выводы.** Установлено, что для получения защитных покрытий наплавкой токами высокой частоты из диффузионно-легированных сплавов на основе чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 размером 500–630 мкм необходимо проводить диффузионное легирование в подвижной порошковой насыщающей среде при температуре 900–950 °С в течение 60 мин и последующую кратковременную высокотемпературную обработку концентрированными источниками энергии с силой тока 100–150 А. Такая комплексная обработка за счет эффекта контактного эвтектического плавления формирует в ДЛ сплав 50–55 % эвтектических структур, обладающих пониженной температурой плавления. Наличие эвтектических структур в ДЛ сплав при наплавке ТВЧ повышает наплавляемость сплава за счет снижения продолжительности формирования жидкой ванны расплава на 40–60 % по сравнению с наплавкой ТВЧ ДЛ сплавами без оплавления.

## Литература

1. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Ф.И. Пантелеенко. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.

**2. Ворошнин, Л.Г.** Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.

**3. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугунной стружки / В.М. Константинов [и др.]; под ред. Ф.И. Пантелеенко – Минск: Технопринт, 2005. – 146 с.**

**4. Современные перспективные материалы / Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изд-вл УО «ВГТУ», 2011. – 562 с.**

**5. Современные перспективные материалы / Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изд-вл УО «ВГТУ», 2013. – 655 с.**

**6. Щербаков, В.Г.** Совершенствование технологий и оборудования для производства диффузионно-легированных наплавочных материалов: дис. маг. техн. наук : 1-48 80 01 / В.Г. Щербаков. – Минск, 2008. – 70 л.

**7. Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.

**8. Пантелеенко, Е.Ф.** Исследование диффузионно-легированных отходов стальной и чугунной дроби для получения защитных покрытий / Е.Ф. Пантелеенко, В.Г. Щербаков // Литье и металлургия. – 2009. – № 1 (50). – С. 176–181.

**9. Щербаков, В. Г.** Некоторые особенности получения диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки из дисперсных отходов стали и чугуна в подвижных порошковых смесях / В.Г. Щербаков // Металлургия : Республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2015. – Вып. 36. – С. 243–249.

**10. Щербаков, В.Г.** Диффузионно-легированные сплавы из металлических отходов производства с пониженной температурой плавления для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты / В.Г. Щербаков // Литье и металлургия. – 2016. – № 4 (85). – С. 89–95.

**11. Щербаков, В.Г.** Особенности формирования индукционной наплавкой диффузионно-легированных сплавов из отходов чугунной дроби после кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии / В.Г. Щербаков // Литейные процессы. – 2016. – №15. – С. 58–67.

**12. Щербаков, В.Г.** Некоторые особенности формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой диффузионно-легированными сплавами из металлических отходов производства / В.Г. Щербаков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3 кн. / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. – Кн. 1: Материаловедение. – С. 278–286.

**13. Щербаков, В.Г.** Эффект контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах из металлических отходов производства при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии / В.Г. Щербаков // Metallurgia : Республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2016. – Вып. 37 – С. 108–117.

**14. Щербаков, В.Г.** Влияние источника тепла на структурообразование в частицах диффузионно-легированного сплава при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии / В.Г. Щербаков // Metallurgia : Республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2016. – Вып. 37 – С. 118–126.

**15. Вращающаяся** электрическая печь для химико-термической обработки сыпучего материала : пат. 15412 Респ. Беларусь, МПК7 F27B 7/14 / В.М. Константинов, О.П. Штемпель, В.Г. Щербаков ; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20091415 ; заявл. 05.10.09 ; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці . – 2012. № 1. – С. 143.

**16. Многофункциональная** научно-исследовательская установка индукционного нагрева сталей и сплавов / В.М. Константинов [и др.] // Metallurgia : Республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2015. – Вып. 36. – С. 255–262.

**17. Установка** для обработки металлического порошка : пат. № 10051 Респ. Беларусь, МПК В 22F 1/00 / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, В.Г. Щербаков; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № и 20130804 ; заявл. 08.10.2013 ; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці . – 2014. – № 2. – С. 136.

**18. Девойно, О.Г.** Технология формирования износостойких поверхностей лазерным легированием / О.Г. Девойно. – УП «Технопринт», 2001. – 180 с.