

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОГО СПЛАВА Т15К6

Целью работы является изучение влияния термической обработки с применением высокоэнергетических источников нагрева (лазером) на эксплуатационные свойства твердосплавных пластин марки Т15К6.

В качестве объекта исследования использовали штабики твердого сплава Т15К6, размером 5×5×35 мм.

Был проведен микроанализ, с целью выявления дефектов лазерной обработки, таких как наличие трещин, отслоений, проводили на электронном микроскопе Jeol ISM -6000 NeoScore с увеличением ×1300.

Определение микротвердости поверхности и приповерхностного слоя до и после упрочнения проводили с помощью микротвердомера ПМТ-3, при нагрузке 1,96 Н.

Определение фазового состава проводили с помощью микродифрактометра МД-10.

С помощью рентгеноспектрального анализа определили параметры решетки, размеры блоков кристаллической решетки (D), микронапряжения ($\Delta d/d$). При заданных условиях термоупрочнения определили приближенную скорость перемещения пучка лазерного излучения относительно детали или детали относительно луча, которую затем корректировали. Обоснования режимов обработки производили согласно матрице планирования дробной реплики от положения факторов эксперимента 2⁴⁻¹.

Ключевые слова: термическая обработка, лазерная обработка, твердосплавные пластины, микротвердость.

Вопросам повышения эксплуатационных свойств твердых сплавов Т15К6 посвящено много работ, в которых рассмотрены различные виды термической и химико-термической обработок, в частности термообработка в соляных ваннах рассмотрена в работах [1]–[13] термообработка токами высокой частоты – [14], лазерная термическая обработка и другие – [15].

Целью работы является изучение влияния термической обработки с применением высокоэнергетических источников нагрева (лазером) на эксплуатационные свойства твердосплавных пластин марки Т15К6.

Термическую обработку проводили на лазерной технической установке «LRS-150А», основные технические характеристики установки представлены в таблице 1.

В качестве объекта исследования использовали штабики твердого сплава Т15К6, размером 5×5×35 мм. Исходные физико-механические свойства представлены в таблице 2.

Внешний вид образцов твердых сплавов, обработанных лазером по различным режимам, представлен на рисунке 1, где W – плотность энергии, Дж/мм²; K_p – коэффициент перекрытия; N – число импульсов; τ – длительность импульсов, мс.

На рисунке 2 приведена микроструктура исходного спеченного твердого сплава Т15К6 и после лазерного воздействия по режиму: $W=0,8$ Дж/мм²; $K_p=0,5$; $N=1$; $\tau=3$ мс.

Микроструктура сплава Т15К6 состоит из трех фаз:

– светлые крупные зерна карбида вольфрама WC;

Таблица 1. Технические характеристики лазерной установки LRS-150А

Параметры импульсно-периодического лазера	
Длина волны излучения	1,064 мкм
Режим работы	импульсно-периодический
Максимальная энергия импульса излучения	50 Дж

Таблица 2. Физико-механические свойства исходного твердого сплава Т15К6

Твердость, HV	1478
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	13-38
Коэффициент удельной теплоемкости, Дж/(кг·°С)	251,4
Коэффициент линейного расширения, ×10 ⁶ К ⁻¹	5,6-6,0
Предел прочности при изгибе, Н/мм ²	1127-1180

– светлые мелкие зерна карбида титана TiC;
– темная фаза располагается вокруг светлых зерен и состоит из кобальта, в котором растворено некоторое количество карбидов вольфрама и титана.

После лазерного воздействия (рисунок 2б) увеличивается количество темной фазы, идет растворение карбидов вольфрама и титана в кобальте.

Микроанализ, с целью выявления дефектов лазерной обработки, таких как наличие трещин, отслоений, проводили на электронном микроскопе Jeol ISM -6000 NeoScope с увеличением $\times 1300$.

Определение микротвердости поверхности и приповерхностного слоя до и после упрочнения проводили с помощью микротвердомера ПМТ-3, при нагрузке 1,96 Н. Значение величины микротвердости рассчитывали, как среднее, по 3 отпечаткам.

Микрошлифы для установления зоны повышенной твердости и глубины ее залегания подготавливали по следующей методике: поверхности шлифа выравнивались шлифовальным кругом из карбида кремния марки К325М3 СМ1К по ГОСТ 3647-71 с

обильным охлаждением 5% раствором эмульсионной жидкости; шлифование образцов осуществлялось с применением алмазного порошка АСМ14 по ГОСТ 9206-70; полировку шлифа проводили алмазным порошком АСМ3-5, нанесенным на диск обтянутый фетровой тканью.

При исследовании тонкой структуры твердых сплавов методами электронной микроскопии проводилось электролитическое полирование и травление в смеси 70% ортофосфорной (60 мл) и 75% серной (40 мл) кислот.

Травление образцов осуществляли реактивом: красная кровяная соль 1г., едкий калий 1г., вода 10 мл.

Фрактография излома твердого сплава, после лазерного воздействия по режиму: $W=0,8$ Дж/мм²; $K_p=0,5$; $N=1$; $\tau=3$ мс представлена на рисунке 3.

Выявлен характер излома – хрупкий, межзеренный с участками квазихрупкого внутризернистого разрушения. Причем площади участков межзеренного и внутризеренного разрушения на поверхности излома примерно одинаковы.



а)

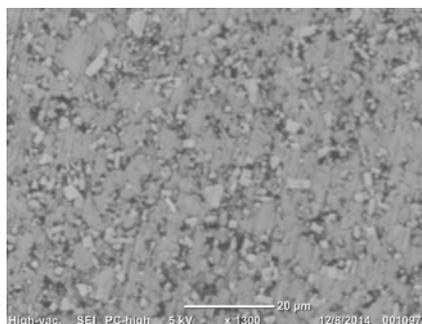
$W=1,4$ Дж/мм²
 $K_p=1,25$
 $N=2$
 $\tau=7$ мс



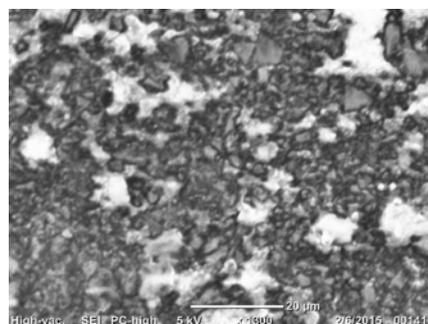
б)

$W=0,8$ Дж/мм²
 $K_p=0,5$
 $N=1$
 $\tau=3$ мс

Рисунок 1. Внешний вид образцов твердого сплава Т15К6



а) Т15К6 – исходный



б) Т15К6 после лазерного воздействия

Рисунок 2. Микроструктура спеченного твердого сплава Т15К6, $\times 1300$

Определение фазового состава проводили с помощью микроdifрактометра МД – 10. Диапазон регистрации дифрактометра от 16° до 120° двумя поддиапазонами одновременной регистрации спектра от 16° до 70° или от 65° до 120° с интервалом перекрытия поддиапазонов 5°. Среднеквадратичное отклонение определения угловой координаты одного и того же дифракционного пика не более 0,02°.

На рисунке 4 представлен рентгеноспектральный анализ твердого сплава Т15К6.

С помощью рентгеноспектрального анализа определили параметры решетки, размеры блоков кристаллической решетки (D), микронапряжения ($\Delta d / d$) (таблица 3).

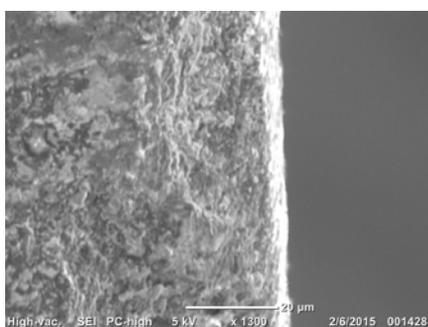
Карбиды вольфрама (WC), дивольфрама (W_2C) и титана (TiC) представлены полным набором дифракционных линий, также как и Co -фаза. Карбиды WC , W_2C имеют гексагональную плотноупакованную решетку (ГПУ), а TiC , Co имеют гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК). Наличие линий и соотношение их интенсивностей соответствуют наличию WC , TiC и Co в твердом сплаве. Лазерное воздействие на поверхность твердого сплава Т15К6 не вызывает изменения фазового состава твердого сплава, но влияет на размеры мозаичных блоков и величину микронапряжений.

При линейной схеме термоупрочнения важной технологической характеристикой процесса является коэффициент перекрытия, вычисляемый по формуле

$$K_p = \frac{S}{d}, \tag{1}$$

где S – шаг расположения последовательных зон лазерного воздействия мм,

d – диаметр единичной зоны, мм.



а) край

Скорость обработки V , равна

$$V = \frac{L}{t} = \frac{nd}{t} K_p, \tag{2}$$

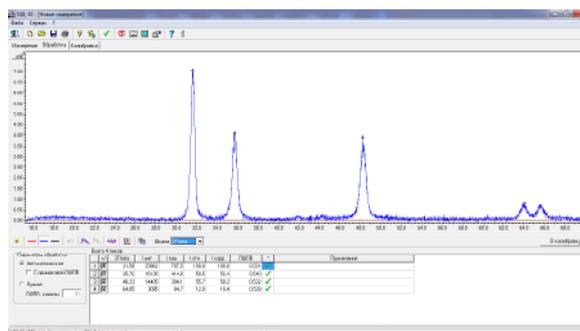
где t – время обработки, с;

n – количества импульсов излучения;

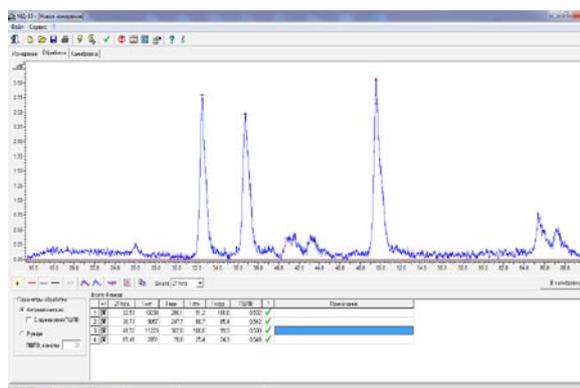
L – длина обработки, м.

При плоском термоупрочнении определяется коэффициент заполнения профиля

$$K_z = \frac{F'}{F}, \tag{3}$$

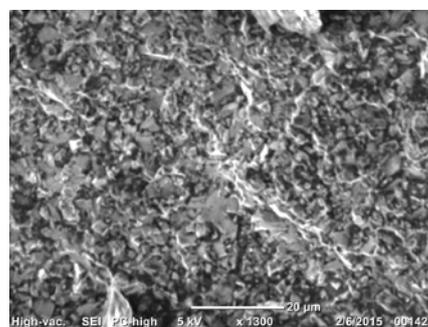


а) исходный Т15К6;



б) Т15К6 после лазерного воздействия по режиму:
 $W=0,8$ Дж/мм²; $K_p=0,5$; $N=1$; $\tau=3$ мс

Рисунок 4. Дифрактограмма твердого сплава Т15К6



б) посередине

Рисунок 3. Фрактография излома Т15К6, x1300

где F' – площадь облученной поверхности, мм²;

F – площадь, подлежащая облучению, мм².

Коэффициент использования импульсов K_i или отношение действительной площади облученной поверхности n импульсами к максимальной теоретической площади облучения, которая может быть достигнута при воздействии тех же n импульсов, определяется по формуле

$$K_i = \frac{4F'}{\pi n d^2} \quad (4)$$

Использование обработки поверхностей без перекрытия пятен с $K_p=1$ обеспечивает более высокую эффективность.

Режим поверхностного термоупрочнения при работе на лазерах с импульсным излучением подбирали непосредственно на обрабатываемых образцах.

На твердотельных импульсных лазерах, работающих в режиме свободной генерации (длительность лазерного импульса примерно равна длительности вспышки лампы накачки), термоупрочнение без оплавления вели на критической энергии пучка лазерного излучения E_i . Выбор критической энергии производили следующим образом: при выбранном диаметре пучка лазерного излучения на обрабатываемой поверхности проводили термоупрочнение при различных энергиях излучения. Значение энергии E_i изменяем за счет изменения величины напряжения накачки U_n . Критической считается та энергия, превышение которой приводит к оплавлению поверхности обработки, при этом считается, что длительность импульса лазерного излучения остается постоянной. Однако, исследования на лазерной технологической установке «LRS-150А» показали, что чем больше U_n , тем больше E_i и наоборот.

Практическая работа на установке «LRS-150А» подтвердила, что микротвердость упроч-

ненной поверхности H и глубина упрочненного слоя X изменяются в соответствии с изменением значения напряжения накачки.

Исходя из условия, что лазерное термоупрочнение происходит при достижении температуры фазовых превращений T_0 и что температура материала достигнет к концу прохождения светового пятна над рассматриваемой точкой, получена эмпирическая зависимость, связывающая глубину термоупрочнения X , эффективный размер пучка излучения лазера r_0 , скорость перемещения P и физические свойства обрабатываемого материала

$$X = \sqrt{\frac{8ar_0}{\pi V} - \frac{\pi acr_0^2 \rho T_0}{\eta P}}, \quad (5)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж кг⁻¹К⁻¹;

ρ – плотность, кг/м³;

η – коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью материала;

a – температуропроводность, м²/с.

По этой зависимости, при заданных условиях термоупрочнения определили приближенную скорость перемещения пучка лазерного излучения относительно детали или детали относительно луча, которую затем корректировали. Обоснования режимов обработки производили согласно матрице планирования дробной реплики от положения факторов эксперимента 2⁴⁻¹ (таблица 4). За варьируемые параметры принимали плотность энергии импульса лазерного излучения ($W=(1,4\pm 1)$, Дж/мм² (X_1)), число импульсов ($N=(2\pm 1)(X_2)$), длительность импульсов $\tau=(7\pm 4)10^{-3}$ с (X_1) лазерного излучения и коэффициент перекрытия $K_p=(1,25\pm 0,75)(X_3)$. Выходные параметры: твердость обработанного образца (HV), предел прочности ($\sigma_{изг}$, МПа) и износ (h , мм).

В данных экспериментах за основу при построении интерполяционной модели стойкости упрочненного термической обработкой инструмента был выбран метод дробного факторного эксперимента 2⁴⁻¹.

Таблица 3. Параметры тонкой структуры WC и TiC фазы сплава T15K6 после лазерного воздействия

Вид термической обработки	Фазовый состав	Индекс кристаллографического направления	
		001	001, 002
		D·10 ⁻⁷	Δd/d·10 ⁻³
Сплав после спекания	WC, W2C – ГПУ TiC, Co – ГЦК	270	4,12
Импульсная лазерная обработка	WC, W2C – ГПУ TiC, Co – ГЦК	120	7,12

В качестве параметров оптимизации были выбраны: предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, твердость HV и износ h . Факторы, влияющие на параметры, варьирования в следующих пределах: плотность энергии импульса лазерного излучения $W=(1,4\pm 0,6)$ Дж/мм² (X_1), число импульсов $N=(2\pm 1)$ (X_2), коэффициент перекрытия $K_p=(1,25\pm 0,75)$ (X_3), длительность импульса $\tau=(7\pm 4)10^{-3}$ с (X_4).

Для сплава Т15К6 получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned} HV &= 1625 + 90X_1 - 10X_4 \\ \sigma_{изг} &= 1318 - 220X_1 - 320X_2 + 600X_3 - 270X_4 \\ \varepsilon &= 2,4625 + 1,3X_1 + 0,5X_2 + 4,2X_3 - 1,5X_4 \end{aligned}$$

После этого осуществляли расчет линейного уравнения регрессии для лазерной термообработки твердосплавных пластин по твердости HV. Проводили расчеты параметров оптимизации Y , их доверительных интервалов Y , дисперсии S , доверительных интервалов для коэффициентов регрессии, параметров, предсказанных уравнением Y_{HV} и дисперсии адекватности $S_{ад}$. Гипотезу величины последней проверяли с помощью критерия Фишера ($F_{расч} < F_{табл}$). Расчетная величина $F_{расч} = 2,129$, а $F_{табл} = 2,45$. Таким образом, урав-

нение регрессии адекватно описывает процесс лазерного упрочнения и им можно пользоваться для дальнейшего планирования термообработки с помощью лазерного воздействия.

После анализа исходных образцов твердого сплава Т15К6 и термообработанных лазером можно сделать вывод, что лазерная термообработка влияет на уменьшение дисперсности структуры, что влияет на относительную износостойкость. Образцы с мелкозернистой структурой обладают большей относительной износостойкостью.

Абразивный износ образцов твердого сплава Т15К6 определяли в следующей последовательности: образец прижимали к поверхности трения с усилием 3,6 кН, скорость вращения абразивного круга составила 3000 мин⁻¹, абразивом служил алмазный круг на бакелитовой связке зернистостью А5-АМ40, концентрация алмаза – 50%.

Интенсивность изнашивания образцов определяли по соотношению потери в весе на длину пройденного пути по поверхности трения. Относительную износостойкость испытуемого образца определяли по формуле

Таблица 4. Условия и результаты термической обработки сплава Т15К6 непрерывным лазерным излучением $\sigma_{изг}$

Фактор	Плотность энергии, W , Дж/мм ²	Число импульсов, N	Коэффициент перекрытия, K_p	Длительность импульса, τ , мс	Твердость, HV	Предел прочности при изгибе, $\sigma_{изг}$, Н/мм ²	Износ по задней поверхности, h , мм
Основной уровень (0)	1,4	2	1,25	7			
Шаг варьирования	0,6	1	0,75	4			
Верхний уровень (+)	2	3	2	11			
Нижний уровень (-)	0,8	1	0,5	3			
№ опыта	X_1	X_2	X_3	$X_4 = X_1 X_2$	Y_1	Y_2	Y_3
1	+	+	+	+	1525	2100	2,3
2	-	+	+	-	1535	2005	2,7
3	+	-	+	-	1510	2320	2,5
4	-	-	+	+	1510	1950	1,9
5	+	+	-	+	1530	1895	1,4
6	-	+	-	-	1530	1965	1,5
7	+	-	-	-	1510	1920	1,2
8	-	-	-	+	1505	1995	1,1
9	0	0	0	0	1525	2090	2,9
10	0	0	0	0	1530	2100	2,8
11	0	0	0	0	1525	2095	2,9
Исходные					1478	1180	4,2

Таблица 5. Влияние лазерной обработки на относительную износостойкость твердого сплава Т15К6

Номер образца (по матрице)										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Относительная износостойкость ε_i										
3,0	3,4	3,3	2,4	2,0	2,1	1,8	1,7	2,0	2,14	2,2

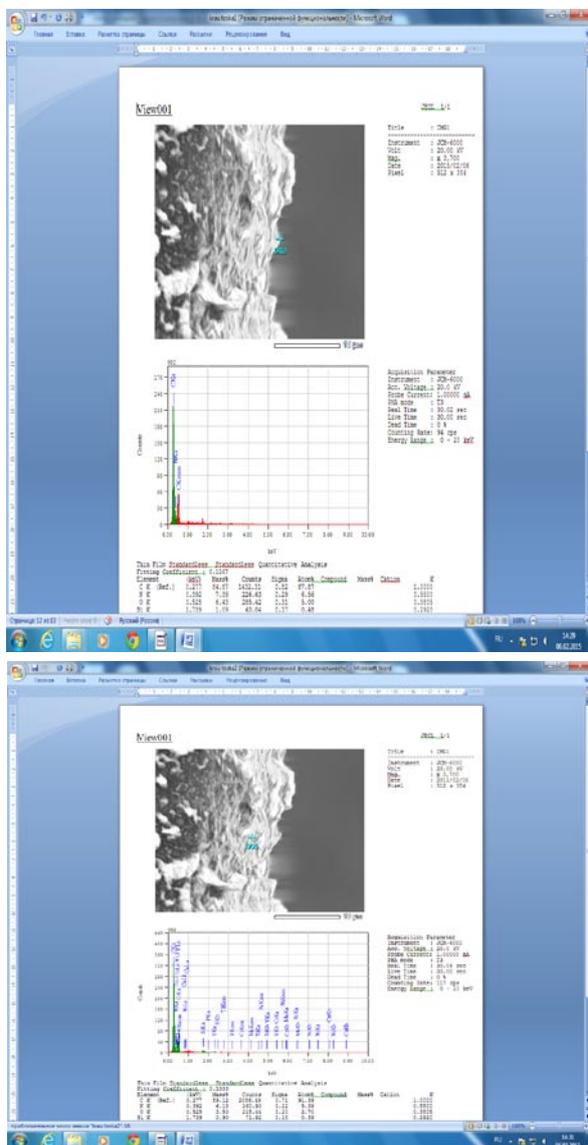


Рисунок 5. Элементный анализ спеченных твердых сплавов Т15К6

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_0}, \quad (6)$$

где ΔP_i – износ исследуемого материала, г.;
 ΔP_0 – износ эталонного материала, г.

За величину относительной износостойкости каждой партии образцов твердого сплава принимали среднюю величину из 5 экспериментов (таблица 5). В качестве эталона были взяты образцы твердого сплава Т15К6 в исходном состоянии.

Анализ данных, приведенных в таблице 5 показал, что относительная износостойкость твердого сплава Т15К6 уменьшается с увеличением плотности энергии и длительности импульса лазерного излучения.

На рисунке 5 показан элементный анализ в двух точках твердого сплава Т15К6 после лазерной обработки.

Элементный анализ в двух точках твердого сплава Т15К6 показал на наличие на поверхности большого количества кислорода (окисляемость поверхности), а значимой разницы в анализируемых элементах (С) нет.

Таким образом, лазерная термическая обработка может являться одним из приемлемых методов повышения эксплуатационных характеристик твердых сплавов Т15К6 в 1,5–2 раза.

15.10.2014

Список литературы:

1. Богодухов, С.И. *Материаловедение: учеб. для вызов / С.И. Богодухов, Е.С. Козик*; – Старый Оскол: ТНТ, 2014.-649с.
2. Бондаренко, В.А. *Обеспечение качества и улучшение характеристик режущих инструментов / В.А. Бондаренко, С.И. Богодухов*. – М.: Машиностроение, 2000. – 141с.
3. Лошак, М.Г. *Прочность и долговечность твердых сплавов/ М.Г Лошак*. – Киев: Наук. думка, 1984.– 328с.
4. Богодухов, С.И. *Курс материаловедения в вопросах и ответах: учеб. пособие для вузов / С.И. Богодухов, А.В. Синюхин, Е.С. Козик*. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014.-564 с.
5. Богодухов, С.И., Упрочнение поверхности низкоуглеродистой стали самофлюсующимися твердыми сплавами / С.И. Богодухов, Д.И. Чурносков, Е.С. Козик, Е.В. Солосина // *Заготовительные производства в машиностроении*, 2014.– № 3.– С. 38-40.
6. Богодухов, С.И. *Определение модуля упругости различных материалов с применением средств тензометрии / С.И. Богодухов, В.С. Гарипов, Е.В. Солосина // Вестник Оренбургского государственного университета*. – Оренбург: 2014. – N 4. – С. 289-295.

7. Козик, Е.С. Коррозионная стойкость низкоуглеродистых сталей с гальваническими покрытиями / Е.С. Козик, С.И. Кошелев, Е.В. Кушнарченко, Б.М. Шейнин, В.С. Правдин, Е.В. Солосина // Вестник Оренбургского государственного университета: Оренбург, 2013. – N 1. – С. 182-186.
8. Богодухов, С.И. Пат. № 2491355 Российская Федерация. Способ термической обработки изделий типа штоков / С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик, С.А. Лобода, Е.В. Солосина // заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет (RU). – заявл. 05.03.2012, опуб. 27.08.2013, № 24.
9. Богодухов, С.И. Термическая обработка твердого сплава Т14К8 / С.И. Богодухов, В.С. Гарипов, Е.С. Козик, Е.В. Солосина // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 12. – С. 41– 44.
10. Богодухов, С.И. Пат. № 2517093 Российская Федерация. Способ термической обработки режущего инструмента с напаянной твердосплавной пластиной / С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик, Б.М. Шейнин, Е.В. Солосина // заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет (RU). – заявл. 09.04.2013, опубл. 27.05.2014, № 15.
11. Богодухов, С.И. Пат. № 2528539 Российская Федерация. Способ получения режущего инструмента из карбидосодержащих сплавов вольфрамовой (ВК) титано-вольфрамовой (ТК) групп / С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик, Б.М. Шейнин, В.С. Гарипов, Е.А. Шеин, Е.В. Солосина // заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет (RU). – заявл. 07.05.2013, опуб. 20.09.2014, № 26.
12. Богодухов, С.И. Пат. № 2534670 Российская Федерация. Способ упрочнения твердых сплавов / Е.В. Солосина, С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик, Б.М. Шейнин, Е.В. Солосина // заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет (RU). – заявл. 11.06.2013, опуб. 10.12.2014, № 35.
13. Богодухов, С.И. Методы повышения эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента / С.И. Богодухов, В.С. Гарипов, Е.С. Козик, Б.М. Шейнин; ФГБОУ ВПО ОГУ. – Оренбург, 2013. – 24 с. – Деп. в ВИНТИ 29.05.2013 № 156-В2013.
14. Панов, В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В.С. Панов, А.М. Чувилин. – М.: МИСИС, 2001. – 428 с.
15. Лошак, М.Г. Упрочнение твердых сплавов / М.Г. Лошак. – К.: Наукова думка, 1997. – 142 с.

Сведения об авторах:

Козик Елена Станиславовна, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов
Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук

Свиденко Екатерина Валерьевна, аспирантка кафедры материаловедения и технологии материалов
Оренбургского государственного университета, e-mail: ele57670823@yandex.ru

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел.: (3532) 372511, e-mail: matm@mail.osu.ru