

**DEVOINO O. G., KARDAPOLOVA M. A., LUTSKO N. I., LAPKOVSKIY A. S. Modes microhardness in multimodal coatings of heterogeneous materials, obtained by laser cladding**

The article shows the possibility of constructing multimodal coatings from dissimilar materials by laser cladding. When cladding, the beds of self-fluxing alloy and bronze alternated with each other. It is shown that in such coatings a periodic change in microhardness is observed in the cross section in direction parallel to the base. The effect of laser cladding parameters on the microhardness of multimodal coating modes was studied.

621.91.01

Тепловые явления при резании влияют на качество обработанной поверхности, точность и производительность обработки, износ и стойкость режущего инструмента, что обуславливает актуальность их исследования для новых методов обработки, в частности, профильных цилиндрических поверхностей ротационным точением [1]. Исследования выполнены тепловизором модели Thermo CAM E300, обеспечивающим измерение температуры с погрешностью менее 0,25% [2]. Известно применение этого метода для измерения температуры в зоне резания [3].

Влияние на температуру резания параметров схем обработки и конструктивных параметров инструментов при ротационном точении круглых цилиндрических поверхностей широко отражено в литературных источниках [4–6 и др.]. Известно, что независимо от обрабатываемого материала и схемы резания вращение резца приводит к снижению температуры резания по сравнению с невращающимся резцом и увеличению температурного градиента между резцом и заготовкой. Наибольшее влияние на температуру резания оказывает скорость, наименьшее – подача. Известно, что с увеличением глубины резания скорость самовращения ротационного резца уменьшается, а температура резания повышается [4, 5]. Экспериментально установлено [6] уменьшение температуры при увеличении кинематического коэффициента  $K$ , под которым понимается отношение линейных скоростей резца и заготовки. Наибольшее снижение температуры достигается при  $K = 0,2...1,0$  [5]. В [7] отмечается минимум температуры при  $K = 0,5$ . Исследованием [8] установлено, что при возрастании  $K$  в диапазоне  $K = 0...0,2$  температура резания интенсивно уменьшается, а при  $K = 0,2...0,6$  – стабилизируется и имеет минимальные значения. При дальнейшем увеличении кинематического коэффициента температура резания возрастает.

Особенностью ротационного точения профильных поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом [1] является то, что величина кинематического коэффициента значительно больше, чем при обработке круглых поверхностей само- и принудительно вращающимся инструментом, так как частота вращения резца больше частоты вращения заготовки в отношении, равном числу граней профильной поверхности. При этом из-за эксцентричной установки резца относительно оси его вращения параметры срезаемого слоя различны в каждой точке режущей кромки, что связано с переменной глубиной резания при получении профиля из цилиндрических заготовок. Это обуславливает неравномерность температуры по длине режущего лезвия. Анализ литературных данных показал, что тепловые явления при ротационном точении профильных поверхностей не изучены.

Экспериментальные исследования проводились на Витебском станкостроительном заводе «Вистан» на шлицефрезерном станке модели HECKERT GFLV-250. В качестве режущего инструмента применялись круглые ротационные резцы из быстрорежущей стали Р6М5, которые изготавливались переточкой угловых фрез. Геометрические

параметры инструмента: передний угол 10 град; задний 20 град. Обрабатывались заготовки из стали 40Х, предварительно проточенные до диаметра 55...60 мм.

Параметры обработки: количество выступов некруглого профиля  $m = 3; 4$ ; кинематический коэффициент  $K = 2...6$ ; максимальный угол контакта  $\varphi_{p \max} = 30$  град; частота вращения резца  $n_r = 56; 71; 90; 112$  мин<sup>-1</sup>; глубина резания  $t = 0,5...3$  мм; диаметр резца  $D_p = 50; 60$  мм; подача  $S_0 = 0,14...1,34$  мм/об. Обработка производилась с применением смазочно-охлаждающей жидкости (масло индустриальное И-20) и без охлаждения. Глубина резания задавалась исходя из условия формирования некруглой поверхности за один проход.

Температура стружки в момент ее формирования и передней поверхности ротационного резца при выходе лезвия из зоны резания измерялась тепловизором модели Thermo CAM E300, позволяющим непрерывно вести съемку объекта с частотой кадров 50 Гц с одновременной фиксацией температурного поля и измерением максимальной температуры объекта. Прибор позволяет измерять температуру в диапазоне от -20 °С до +1200 °С с погрешностью  $\pm 2$  °С от показаний, фиксируемый перепад температур составляет 0,1 °С. Обработка результатов измерений производилась в программе Thermo CAM Quick Report 1.0, входящей в комплект поставки тепловизора.

Корректировка коэффициента излучения возможна в диапазоне 0,01...1,0 с занесением значений в память прибора. Коэффициенты излучения определялись при одновременном нагреве стружки и ротационного резца, которые выдерживали в муфельной печи, нагретой до заданной температуры, контролируемой термопарой. Установлено, что коэффициенты излучения, определенные при температуре 150°С для стружки и 250°С для передней поверхности резца, составляют соответственно  $\varepsilon = 0,67$  и  $\varepsilon = 0,32$ .

Для исследования влияния кинематического коэффициента на температуру обрабатывались заготовки в виде ступенчатого вала диаметром от 25 мм до 55 мм (рисунок 1, а) с перепадом диаметра соседних ступеней 5 мм. Требуемые значения кинематического коэффициента обеспечивались сочетанием диаметров ротационного резца и заготовки.

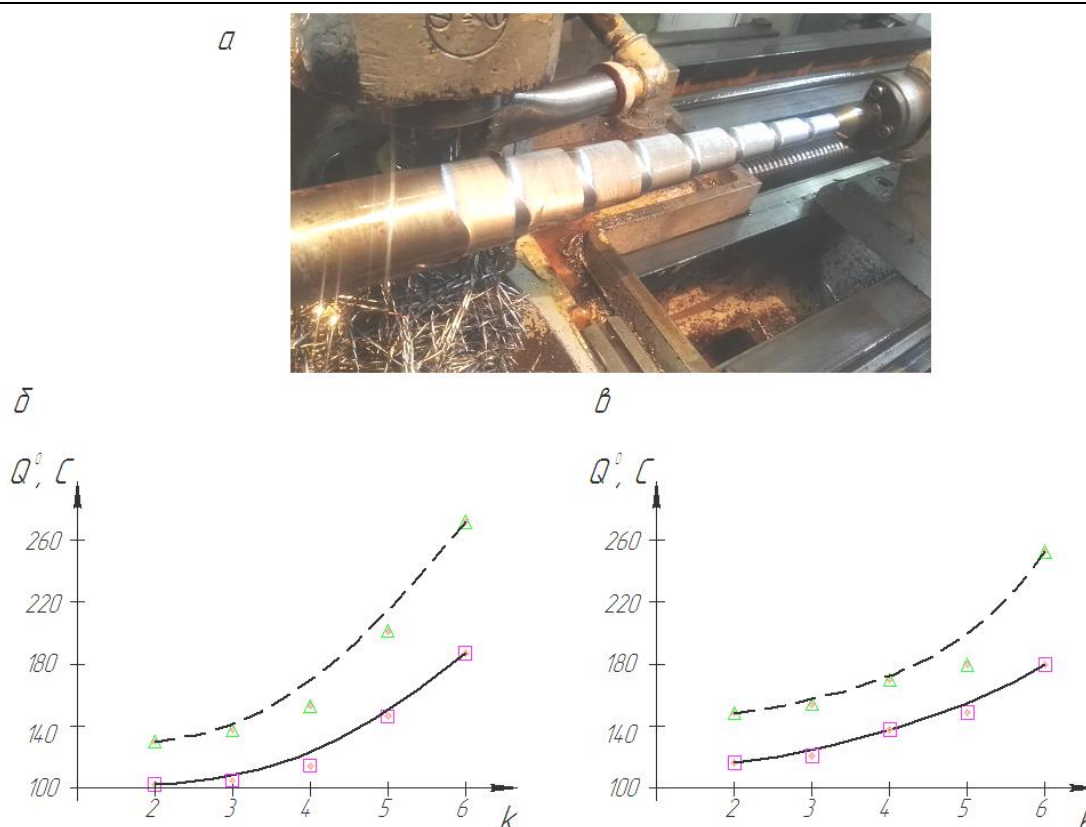
На рисунке 1, б, в показано влияние кинематического коэффициента  $K$  на температуру стружки (сплошные линии) и передней поверхности резца (штриховые линии). Установлено, что с увеличением  $K$  температура повышается: при обработке четырехгранных поверхностей и  $K \leq 4$  ее значения выше, чем трехгранных в среднем на 20 °С. При  $K > 4$  температура стружки и передней поверхности резца практически одинаковые. Рост температуры происходит, поскольку резец не успевает охлаждаться и более нагретым вступает в контакт с заготовкой, в связи с чем менее интенсивно отводится тепло в тело резца.

**Данилов Виктор Алексеевич**, д. т. н., профессор кафедры «Технологическое оборудование» Белорусского национального технического университета; e-mail: [vttools@bntu.by](mailto:vttools@bntu.by).

Беларусь, 220013 г. Минск, ул. Хмельницкого, 9.

**Селицкий Андрей Николаевич**, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта УО «Полоцкий государственный университет»; e-mail: [a.selitskiy@psu.by](mailto:a.selitskiy@psu.by).

Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.



**Рисунок 1** – Обработанный ступенчатый вал (а) и зависимость температуры от кинематического коэффициента ( $S_0 = 0,4$  мм/об;  $t = 2$  мм): б – при обработке трехгранных поверхностей и  $n_t = 56$  мин $^{-1}$ ; в – четырехгранных поверхностей при  $n_t = 112$  мин $^{-1}$

Влияние скорости вращения резца  $v_t$  на температуру стружки и передней поверхности инструмента показано на рисунке 2.

Температура при обработке четырехгранных поверхностей меньше, чем трехгранных. Аналогичные зависимости температуры от скорости отмечены в работах [4, 5, 7] при ротационном точении круглых поверхностей самовращающимся инструментом с кинематическим коэффициентом  $k = 0 \dots 1$ , а также в работе [6] при  $k = 0 \dots 3,5$ , и несколько отличаются от данных [7, 8] по обработке принудительно вращающимся резцом при  $k = 0 \dots 1,2$ . Это объясняется уменьшением количества выделяемой теплоты в результате снижения работы резания при увеличении количества обрабатываемых выступов некруглого профиля. При этом уменьшается время холостого пробега точки режущей кромки, а, следовательно, и время охлаждения контактных поверхностей ротационного резца, что приводит к увеличению его температуры.

При обработке каждой грани профильной поверхности из цилиндрической заготовки за один проход непрерывно изменяется глубина резания от минимального до максимального значений и обратно, что приводит к уменьшению температуры. Кроме того, ширина грани в поперечном сечении четырехугольного профиля меньше, чем у трехугольного (при равных диаметрах), следовательно, любая точка режущей кромки проводит меньше времени в зоне резания, что также способствует уменьшению температуры. Таким образом, снижение температуры происходит под влиянием совокупности двух факторов – скорости вращения резца и глубины резания.

Зависимости температуры стружки и передней поверхности инструмента от подачи  $S_0$  и глубины резания  $t$  представлены на рисунке 3.

С увеличением  $S_0$  и  $t$  температура возрастает: при обработке трехгранных поверхностей (рисунок 3, а) с подачей  $S_0 \leq 0,8$  мм/об и глубиной резания  $t \leq 2$  мм наблюдается плавный рост темпера-

туры; при значениях  $S_0$  и  $t$ , превышающих указанные, температура изменяется более интенсивно; при  $t \geq 3$  мм с увеличением  $S_0$  температура возрастает менее интенсивно.

При обработке четырехгранных поверхностей (рисунок 3, б) с подачей  $S_0 \leq 0,5$  мм/об температура возрастает более интенсивно, чем при больших значениях  $S_0$ , особенно при  $t \geq 3$  мм.

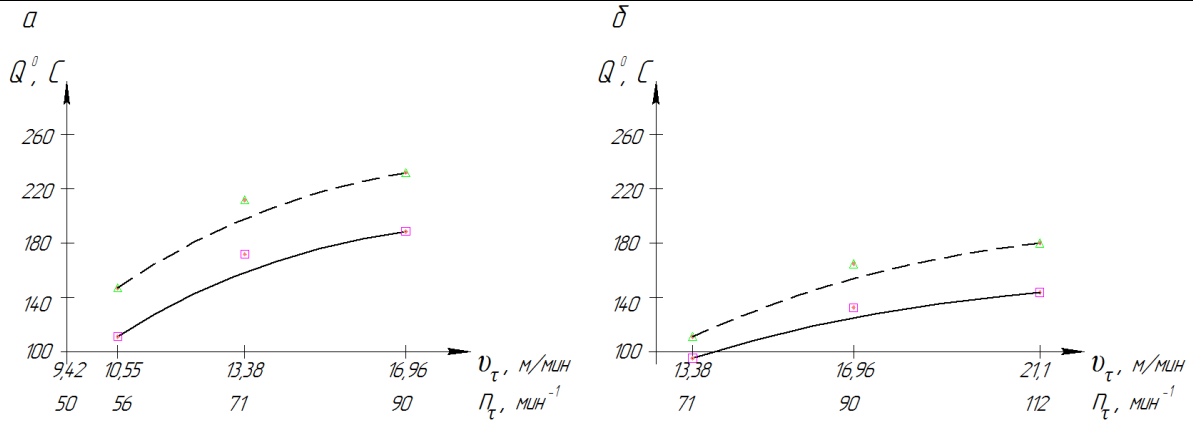
Глубина резания при работе с малыми подачами оказывает меньшее влияние на температуру: так, при  $S_0 = 0,4$  мм/об увеличение глубины резания с  $t = 1$  мм до  $t = 3$  мм привело к увеличению температуры стружки с  $110^\circ\text{C}$  до  $140^\circ\text{C}$  и температуры передней поверхности с  $130^\circ\text{C}$  до  $150^\circ\text{C}$  при обработке поверхностей с тремя гранями и с  $125^\circ\text{C}$  до  $180^\circ\text{C}$  и  $150^\circ\text{C}$  до  $220^\circ\text{C}$  соответственно при обработке четырехгранных поверхностей.

При работе с большими значениями подачи и глубины резания рост температуры стружки и передней поверхности инструмента стабилизируется.

Изменение глубины резания обуславливает переменные условия деформирования срезаемого слоя, что вызывает неравномерность распределения температуры по длине режущего лезвия, что показывает термограмма режущего лезвия (рисунок 4, а).

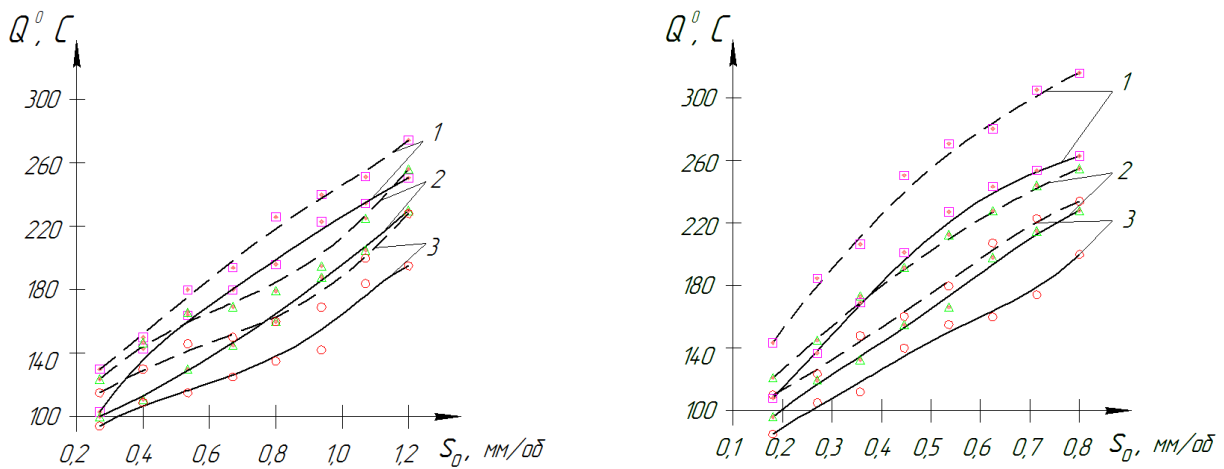
Из рис. 4 а следует, что ротационный резец работает в условиях неустановившегося теплообмена с циклическим изменением температуры, что может быть причиной образования трещин, снижающих режущую способность резца.

Применение смазочно-охлаждающей жидкости, подаваемой в зону резания поливом (рис. 4, б), эффективно снижает температуру, поскольку СОЖ поступает непосредственно на режущее лезвие в период холостого хода и позволяет избежать накопления тепла в инструменте и, следовательно, дополнительного возрастания температуры. При этом накопление тепла происходит в основном в обрабатываемой заготовке.



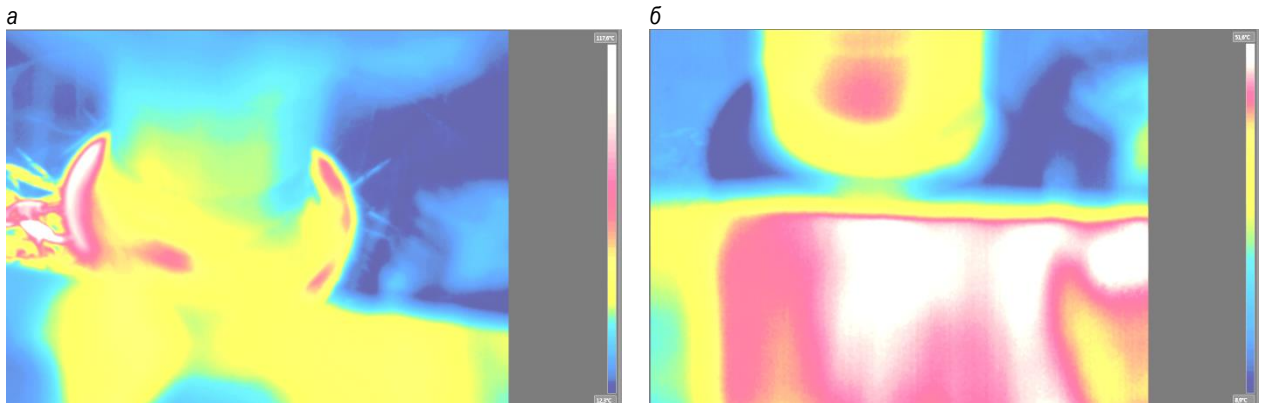
а – при обработке трех граней и  $k = 3,27$ ; б – четырех граней и  $k = 4,36$

**Рисунок 2** – Зависимости температуры от скорости вращения резца ( $S_0 = 0,4$  мм/об;  $t = 2$  мм)



а – при обработке трех граней при  $k = 3,27$ ;  $n_t = 56$  мин<sup>-1</sup>; б – четырех граней при  $k = 4,36$ ;  $n_t = 112$  мин<sup>-1</sup>

**Рисунок 3** – Зависимость температуры от подачи и глубины резания (1 –  $t = 3$  мм; 2 –  $t = 2$  мм; 3 –  $t = 1$  мм)



**Рисунок 4** – Термограмма зоны обработки: а – при работе без СОЖ; б – при работе с СОЖ

На основе результатов экспериментальных данных получена формула для определения температуры:

$$\Theta = 0,25(C_{\Theta k} \cdot k^{p_{\Theta}} + C_{\Theta t} \cdot t^{x_{\Theta}} + C_{\Theta s} \cdot s^{y_{\Theta}} + C_{\Theta v} \cdot v_{\tau}^{z_{\Theta}}),$$

где  $C_{\Theta k}$ ,  $C_{\Theta t}$ ,  $C_{\Theta s}$ ,  $C_{\Theta v}$  – константы, учитывающие условия резания;  $p_{\Theta}$ ,  $x_{\Theta}$ ,  $y_{\Theta}$ ,  $z_{\Theta}$  – показатели степени, характеризующие влияние каждого элемента режима резания на температуру (определяются экспериментально).

**Заключение**

1. Экспериментально установлено, что температура стружки и пер-

редней поверхности режущего лезвия при обработке синусоидальных поверхностей с тремя и четырьмя гранями эксцентрично установленным круглым резцом зависят от числа граней, значения кинематического коэффициента и режима резания.

2. Увеличение кинематического коэффициента вызывает повышение температуры из-за худших условий охлаждения резца. Рост температуры стабилизируется при увеличении скорости вращения резца, подачи и глубины резания.
3. Температура по длине режущего лезвия распределена неравномерно, что обусловлено переменной глубиной резания из-за эксцентричной установки круглого резца.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Данилов, В. А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Горная механика и машиностроение: международный научно-технический журнал. – 2012. – № 4. – С. – 71-82.
2. Сальников, В. С. Оперативные средства мониторинга процесса резания / В. С. Сальников, В. Ч. Хоанг // Известия ТулГУ: Технические науки. – 2013. – Вып. 1. – С. 210–215.
3. Анухин, В. И. Измерение температуры в зоне резания при точении с помощью тепловизионного метода / В. И. Анухин, И. В. Анухин, С. А. Любомудров // Обработка металлов резанием. – 2015. – № 1(85). – С. 6–12.
4. Коновалов, Е. Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е. Г. Коновалов, В. А. Сидоренко, А. В. Соусь; под ред. Е. Г. Коновалова. – Минск : Наука и техника, 1972. – 272 с.
5. Ящерицын, П. И. Ротационное резание материалов / П. И. Ящерицын, А. В. Борисенко, И. Г. Дривотин, В. Я. Лебедев. – Минск : Наука и техника, 1987. – 229 с.
6. Гик, Л. А. Ротационное резание металлов / Л. А. Гик. – Калининград : Книжн. изд-во, 1990. – 254 с.
7. Бобров, В. Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В. Ф. Бобров, Д. Е. Иерусалимский. – М. : Машиностроитель, 1972. – 112 с.
8. Попок, Н. Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами: дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Н. Н. Попок. – Минск, 1983. – 286 л.

18.09.2019

**DANILAU V. A., SIALITSKIY A. N. Research of heat phenomena under rotational turning of a nonround cylindrical and sinusoidal profile surfaces with circular tool fitted out of centre**

The results of an experimental study of the temperature of the chips and the front surface of forcibly rotating circular tool fitted out of centre during the processing of three and tetrahedral cylindrical sinusoidal surfaces are presented. Using the ThermoCAM E300 thermal imager, the influence on the temperature of the number of faces of the sinusoidal surface, the processing circuit parameters, cutting mode and cooling conditions was established.

669.018.95+620.178.162

**Введение.** Вольфрамовые твердые сплавы благодаря своей высокой твердости (82–92 HRA) и износостойкости (в 10–20 раз выше износостойкости инструментов из быстрорежущих инструментальных сталей) находят широкое применение при изготовлении режущего и формирующего инструмента, а также в качестве конструкционного материала для деталей узлов трения.

Традиционные технологии изготовления изделий из порошков твердых сплавов основаны на использовании вакуумного спекания и включают предварительное прессование заготовки на гидравлических или механических прессах в жестких формах или гидростатическое прессование в эластичных оболочках, последующее вакуумное спекание прессованной заготовки в течение нескольких часов и механическую обработку спеченной заготовки [1]. Недостатками этого подхода являются необходимость приложения значительных усилий для предварительного холодного прессования труднодеформируемых порошков твердых сплавов, большая продолжительность процесса спекания, необходимость обеспечения защиты спекаемого материала от окисления, возможный рост зерна кобальтовой связи.

Электроконтактного спекания (ЭКС) порошков твердых сплавов позволяет значительно сократить продолжительность процесса спекания и избежать необходимости создания вакуума или использования защитной атмосферы при спекании. Однако присущие ему нестабильность протекания процесса спекания и, как следствие, достаточно большая неравномерность структуры и нестабильность свойств материала спеченного изделия ограничивает широкое применение этой технологии на практике [2].

Целью настоящей работы являлось совершенствование технологии электроконтактного спекания твердосплавных порошков для повышения стабильности протекания процесса спекания и физико-механических и триботехнических свойств спеченных изделий.

**Отработка состава и режимов спекания модифицированного твердого сплава.** При электроконтактном спекании разогрев спекаемой порошковой композиции происходит, в основном, за счет выделения джоулева тепла на контактах порошков при пропускании через порошковую композицию электрического тока. При этом нестабильность протекания процесса электроконтактного спекания в значительной степени определяется характером распределения начального электросопротивления в порошковой композиции, которое, в свою очередь, существенно зависит от прессуемости материала порошка. При электроконтактном спекании труднодеформируемых порошков твердых сплавов этот аспект приобретает заметное негативное влияние. Решение этой проблемы может быть обеспечено за счет гомогенизации электрической проводимости твердосплавной порошковой композиции посредством ее модифицирования электропроводящим компонентом и механического активирования модифицированной порошковой композиции.

При отработке состава и режимов спекания модифицированного твердого сплава в качестве исходного материала использовался порошок сплава ВК6 (ТУ 48-19-60-78) грануляцией 0–100 мкм. Фракционный состав порошка следующий: 0–40 мкм – 13 %, 40–63 мкм – 65 %, 63–100 мкм – 22 %. Давление электроконтактного спекания на уровне = 20 МПа было принято за нижний пороговый предел нагрузочного параметра, поскольку дальнейшее повышение удельного усилия холодной подпрессовки для порошков твердого сплава не обеспечивает заметного снижения уровня начального удельного электросопротивления порошковой насыпки (рисунок 1). Начальное удельное электросопротивление твердосплавной порошковой насыпки при удельном усилии холодной подпрессовки = 20 МПа, измеренное по методике, изложенной в работе [3], составило  $\rho_0 = (22,1-24,2) \cdot 10^{-5}$  Ом·м.

**Данилов Виктор Алексеевич**, д. т. н., профессор кафедры «Технологическое оборудование» Белорусского национального технического университета; e-mail : mtools@bntu.by.

Беларусь, 220013 г. Минск, ул. Хмельницкого, 9.

**Селицкий Андрей Николаевич**, старший преподаватель кафедры автомобильного транспорта УО «Полоцкий государственный университет»; e-mail : a.selitskiy@psu.by.

Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.