

ного завода, планируемых к производству с использованием кольце-раскатки, наибольшую часть составляют детали типа гильз, которые и будут определять параметры кольце-раскатного комплекса.

**Заключение.** Предложена классификация колец с разбивкой по типам «гильза», «фланец» и «диск» по соотношениям наружный диаметр, внутренний диаметр, высота и ширина кольца. В качестве рекомендуемого параметра для классификации колец по типу «гильза», «фланец» и «диск» предлагается использовать отношение ширины сечения кольца к высоте сечения  $S/h$ . Классификатор колец предлагается к использованию при проектировании технологических процессов кольце-раскатки и выборе основных параметров кольце-раскатного комплекса. Анализ номенклатуры колец для проектируемого кольце-раскатного комплекса на основе предложенного классификатора позволяет выделить удельное соотношение основных типов колец и использовать эту информацию для выбора параметров пресса и кольце-раскатной установки.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ringwalzwerk // [Electronic resource]. – Mode of access: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ringwalzwerk>. – Date of access: 07.01.2013.
2. Koppers U. Grösste Ringwalzmaschine weltweit RAW 2500-1000 / SYMPOSIUM RINGWALZEN 2012 // SMS Meer Ring- und Raderwalzen, Witten. – 2012. – 59s.
3. Ковка и штамповка. Справочник. – Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е. И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1986. – 692 с.
4. Целиков, А. И. Теория прокатки. Справочник / А. И. Целиков [и др.]. – М.: Metallurgiya, 1982. – 335 с.
5. Groche, P. Inkrementelle Massivumformung / P. Groche, D. Fritsche // Werkstattstechnik. – 2005. – № 10. – S. 798–802.
6. Doege, E. Handbuch Umformtechnik / E. Doege, B.-A. Behrens. – Springer Verlag, 2007. – 913 s.
7. Technologiehandbuch Radial-Axial-Ringwalzmaschine / Thyssen Maschinenbau GmbH. – Wagner Dortmund, 1990. – 105 s.
8. Пархомчик, П. А. Особенности использования кольце-раскатного комплекса в производстве деталей ОАО «БелАЗ» / П. А. Пархомчик [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – Выпуск 1.2012. – С. 354–357.
9. Единая система классификации и кодирования технико-экономической информации // [Electronic resource]. – Mode of access: <https://metro-logiya.ru/index.php?action=full&id=130>. – Date of access: 08.10.2019.
10. Technologie-Software ROLLTECH Wagner Banning Ringwalzen. – SMS Meer. – 8 s.

13.12.2019

#### ANTONYUK V. E., YAVORSKY V. V. Development of a ring classifier using the ring rolling process

A classification of rings with a breakdown by type of sleeve, flange and disk according to the ratios of outer diameter, inner diameter, height and width of the ring is proposed. The ring classifier is proposed for use in the design of ring rolling processes and in the selection of the main parameters of the ring rolling complex. Analysis of the nomenclature of rings for the designed ring-rolling complex on the basis of the proposed classifier allows us to identify the specific ratio of the main types of rings and use this information to select the parameters of the press and ring-rolling unit.

621.791.72

**Введение.** Машины и механизмы, используемые современной промышленностью, в большинстве случаев предполагают наличие высоких скоростей и нагрузок. Поэтому постоянно растет потребность в высокоизносостойких материалах. Пределы упрочнения однокомпонентных материалов в настоящее время уже близки к исчерпанию. По этой причине возрастает роль композиционных материалов, позволяющих значительно увеличить износостойкость, в том числе композиционных упрочняющих покрытий. Особенно высокие физико-механические свойства показывает такой вид композиционных покрытий, как мультимодальные покрытия [1, 2]. Модой считается значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, величины пористости, вида материала), которые встречаются наиболее часто. Если имеют место несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, то покрытие является мультимодальным (бимодальным).

Лазерная наплавка позволяет наносить валики небольших размеров, поперечные сечения которых сравнимы с размером лазерного пятна на поверхности наплавки, при этом тепловой вклад в прилегающие области покрытия минимален. Кроме того, при лазерной наплавке перемешивание материала наплавляемых валиков с материалом подложки и с материалом соседних валиков может поддерживаться достаточно низким, наплавленные валики имеют прочное сцепление

между собой и подложкой, диапазон технологических параметров лазерной обработки весьма большой, соответственно параметры нанесения покрытия могут выбираться в достаточно больших пределах [3].

Поэтому лазерная наплавка позволяет создавать мультимодальные покрытия, которые могут наноситься в один, два и более слоев. При этом существует реальная возможность заранее проектировать расположение мод из различных материалов в таком покрытии и, соответственно, придавать покрытиям заранее заданные свойства. Нанесение мультимодальных покрытий требует использования координатных систем с числовым программным управлением для осуществления укладки наплавочных валиков в определенном порядке с достаточной точностью.

**Материалы, методики, оборудование.** Реализация технологии нанесения мультимодальных покрытий методом лазерной наплавки требует понимания процессов, влияющих на формирование физико-механических свойств материалов валиков из компонентов мультимодального покрытия. В статье исследуется распределение микротвердости в двухслойном (3D) мультимодальном покрытии, нанесенном послойно с чередованием валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 с валиками из бронзы ПГ-19М-01 в каждом слое. Химический состав исходных порошков приведен в таблице 1.

*Девойно Олег Георгиевич, д. т. н., проф., зав. ОНИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.*

*Кардаполова Маргарита Анатольевна, к. т. н., доцент, вед. н. с. ОНИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.*

*Луцко Николай Иванович, науч. сотр. ОНИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.*

*Лепковский Александр Сергеевич, науч. сотр. ОНИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.*

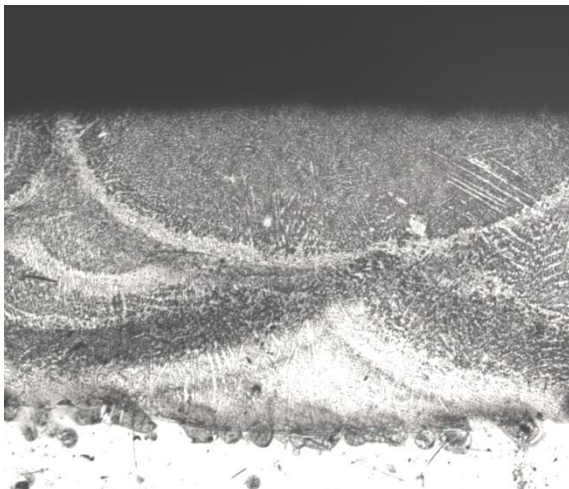
*Беларусь, 222160, Минская область, г. Жодино, ул. 40 лет Октября, 4.*

**Таблица 1** – Химический состав наплавлявшихся материалов

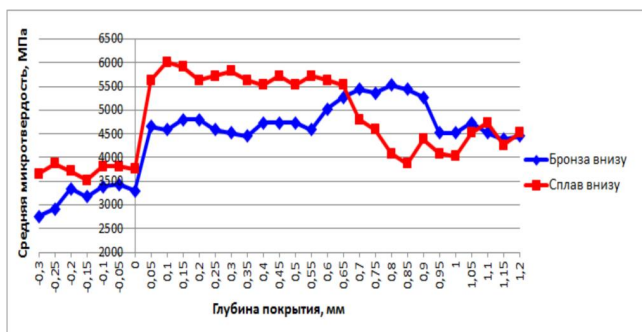
Марка	Содержание компонентов, % (по массе)							
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Cu	Al
ПГ-12Н-01	8-14	1,7-2,5	1,2-3,2	1,2-3,2	0,3-0,6	Основа	-	-
ПГ-19М-01	-	-	-	До 4	-	-	Основа	8,5-10,5

Мультимодальные покрытия наносились на установке для лазерной наплавки на базе CO<sub>2</sub> лазера непрерывного действия типа «Комета 2» и координатного стола с системой числового программного управления «Маш 3». Наплавка велась в четыре этапа. На первом этапе на основу наносилась решетка из параллельных валков из сплава ПГ-12Н-01 с различными шагами, на втором этапе между валиками из сплава ПГ-12Н-01 наплавлялись валики из бронзы ПГ-19М-01. Далее снова выполнялись этапы 1 и 2, основой для наплавки являлся уже нанесенный слой, только наплавка валиков второго слоя производилась со смещением, так, чтобы валики из сплава ПГ-12Н-01 располагались над валиками из бронзы ПГ-19М-01, и наоборот.

3D мультимодальное покрытие, в результате, представляло собой матрицу из сплава ПГ-12Н-01 со средней микротвердостью 5000 МПа, в которую внедрены области из бронзы ПГ-19М-01 со средней микротвердостью 4000 МПа. Области (моды) самофлюсующегося сплава и бронзы в поперечном сечении 3D мультимодального покрытия располагались практически в шахматном порядке (рисунок 1). После механической обработки в плане сверху такое покрытие представляло собой полосчатую структуру, в которой чередуются полосы из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

**Рисунок 1** – Поперечное сечение 3D мультимодального покрытия х50

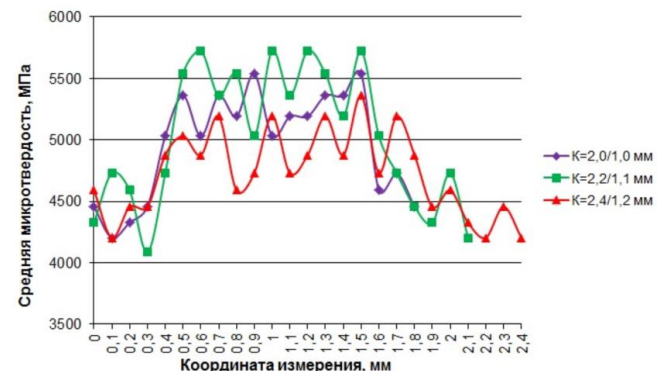
Измерения микротвердости выполнялись на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г по глубине покрытия по линиям симметрии валков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, находившихся в первом слое покрытия, из основы в покрытие с шагом 0,05 мм, и в продольном направлении вдоль поперечного сечения слоя параллельно основе с шагом 0,1 мм.

**Рисунок 2** – Распределение микротвердости по глубине 3D мультимодального покрытия

**Результаты и обсуждение.** Распределение микротвердости по глубине 3D мультимодального покрытия, описанного выше, представлено на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, в случае, когда внизу находится валик бронзы, на границе основа-покрытие наблюдается достаточно резкий рост микротвердости до значений 4300–4800 МПа, что соответствует бронзовой составляющей мультимодального покрытия. На таком уровне микротвердость остается до расстояния от основы 0,55 мм, когда при переходе к моде самофлюсующегося сплава микротвердость возрастает до 5200–5800 МПа и сохраняется на таком уровне до расстояния от основы 0,9 мм. После этого при переходе к стыку двух валков бронзы над серединой валика из сплава ПГ-12Н-01 происходит снижение микротвердости покрытия до 4500–4800 МПа. Таким образом, для случая, когда внизу находится валик бронзы, по глубине двухслойного мультимодального покрытия наблюдаются три зоны микротвердости. При переходе от одной зоны микротвердости к другой, изменение микротвердости происходит достаточно резко, что свидетельствует о небольших величинах переходных зон. Когда внизу находится валик из сплава ПГ-12Н-01, видно, что на границе основа-покрытие происходит резкий рост микротвердости до значений 5000–5800 МПа, что соответствует сплаву ПГ-12Н-01. На таком уровне микротвердость сохраняется до расстояния от основы 0,65 мм. После этого происходит снижение микротвердости покрытия до 4200–4700 МПа, что связано с переходом в бронзовую моду мультимодального покрытия. Таким образом, для случая, когда внизу находится самофлюсующийся сплав, по глубине двухслойного мультимодального покрытия наблюдаются две зоны микротвердости. Величина переходных зон, как и в предыдущем случае, небольшая.

Результаты измерения микротвердости в продольном направлении вдоль поперечного сечения слоя 3D мультимодального покрытия параллельно основе представлены на рисунке 3. Координаты начальной точки измерения выбирались примерно в середине левого валика из бронзы ПГ-19М-01, координаты конечной точки измерения – примерно в середине правого валика из бронзы.

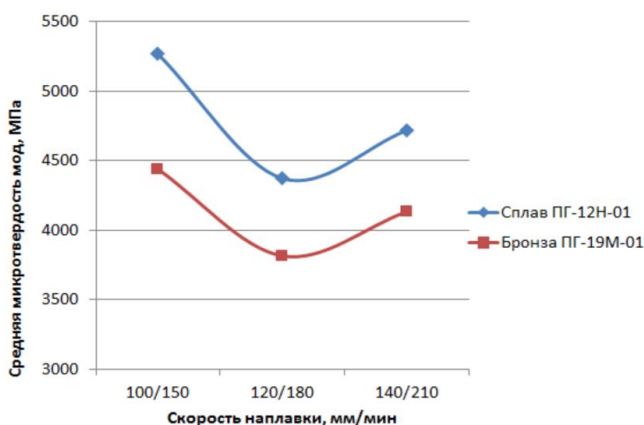
Из рисунка 3 видно, что при всех исследованных шагах наплавки в продольном направлении двухслойного мультимодального покрытия наблюдается периодичность изменения микротвердости. Вначале, когда измерения выполняются в моде бронзы ПГ-19М-01, средняя микротвердость покрытия находится в пределах 3300–4750 МПа, затем, при переходе в моду сплава ПГ-12Н-01, наблюдается увеличение микротвердости до 4400–5600 МПа. И, наконец, когда измерения снова проводятся в моде бронзы, средняя микротвердость опять уменьшается до 3300–4750 МПа. Такие периодические изменения микротвердости происходят вдоль всего поперечного сечения двухслойного мультимодального покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

**Рисунок 3** – Распределение микротвердости в 3D мультимодальном покрытии в направлении параллельно основе

Таким образом, при помощи лазерной наплавки существует возможность создавать мультимодальные полосчатые покрытия, состоящие из полос разнородных материалов и при этом добиваться периодичности изменения микротвердости покрытий в поперечном сечении, по глубине покрытия и в плане сверху. Варьируя соотношение шагов наплавки одноименных/разноименных валиков, можно добиваться разной периодичности изменения этой характеристики покрытий.

Для определения влияния режимов лазерной наплавки на микротвердость мод в 3D мультимодальном покрытии были построены зависимости средней микротвердости моды сплава ПГ-12Н-01 и моды бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки и шага наплавки (рисунки 4–5).

Как видно из рисунка 4, средняя микротвердость моды сплава ПГ-12Н-01 в двухслойном мультимодальном покрытии при увеличении скорости наплавки вначале уменьшается, а затем несколько увеличивается. Такая зависимость объясняется тем, что с увеличением скорости наплавки уменьшается энергозатраты в покрытие. При скорости наплавки 100 мм/мин энергозатраты в покрытие достаточны для образования сравнительно большой ванны расплава, в то же время скорость отвердевания такова, что позволяет получить зернистость покрытия, обеспечивающую повышенную микротвердость. При увеличении скорости наплавки до 120 мм/мин энергозатраты в покрытие уменьшаются. При этом уменьшается размер ванны расплава и увеличивается скорость отвердевания при одном и том же количестве подаваемого порошка. Все большую роль начинает играть неполное сплавление материала валиков по границам зерен, которое приводит к уменьшению средней микротвердости моды сплава ПГ-12Н-01 в мультимодальном покрытии. С увеличением скорости наплавки до 140 мм/мин средняя микротвердость моды сплава ПГ-12Н-01 несколько увеличивается. Последнее происходит вероятнее всего из-за увеличения скорости отвердевания до того уровня, когда в покрытии в большом количестве фиксируются высокотемпературные соединения, имеющие высокую микротвердость.



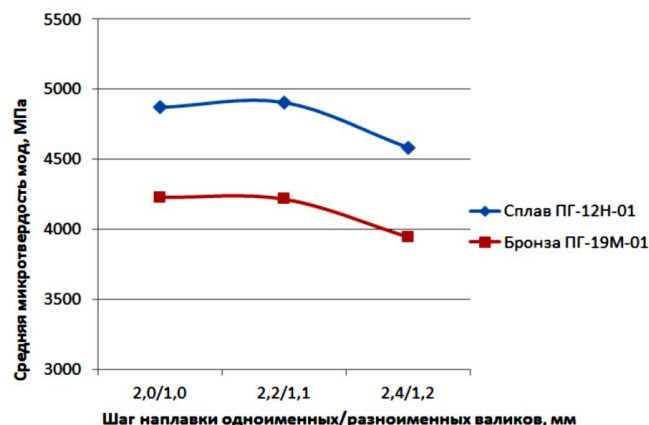
**Рисунок 4** – Зависимости средней микротвердости мод сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в двухслойном мультимодальном покрытии от скорости наплавки

Также на рисунке 4 представлена зависимость средней микротвердости моды бронзы ПГ-19М-01 в мультимодальном покрытии от скорости наплавки. Видно, что характер зависимости средней микротвердости моды бронзы от скорости наплавки в 3D мультимодальном покрытии идентичен зависимости, приведенной для моды сплава ПГ-12Н-01. Можно предположить, что такой характер зависимости объясняется теми же причинами, которые рассмотрены выше для моды сплава ПГ-12Н-01.

На рисунке 5 показана зависимость средней микротвердости моды сплава ПГ-12Н-01 в двухслойном мультимодальном покрытии от шага наплавки. Из рисунка 5 ясно, что при шагах наплавки одноименных/разноименных валиков 2,0/1,0 мм и 2,2/1,1 мм наблюдается практически одинаковая максимальная микротвердость. При этих шагах наплавки за счет хороших условий нагрева-охлаждения при наплавке соседних валиков в покрытии создаются условия для формирования оптимальной зернистости структуры и хорошего сплавления материала покрытия по границам зерен, что и обеспечивает повышенную величину средней микротвердости. Увеличение шага наплавки до 2,4/1,2 мм приводит к тому, что повторные нагревы при наплавке соседних валиков происходят реже. Имеет место уменьшение энергозатрат в покрытие. В этом случае начинает сказываться неполное сплавление мате-

риала покрытия по границам зерен, вызывающее уменьшение средней микротвердости моды сплава ПГ-12Н-01.

Там же, на рисунке 5, показана зависимость средней микротвердости моды бронзы ПГ-19М-01 в 3D мультимодальном покрытии от шага наплавки. Как и для фазы сплава ПГ-12Н-01, при шагах наплавки одноименных/разноименных валиков 2,0/1,0 мм и 2,2/1,1 мм наблюдается практически одинаковая повышенная микротвердость. При увеличении шага наплавки до 2,4/1,2 мм средняя микротвердость моды бронзы ПГ-19М-01 уменьшается. Причины такой зависимости средней микротвердости фазы бронзы от шага наплавки объясняются теми же факторами, которые рассмотрены выше для фазы сплава ПГ-12Н-01.



**Рисунок 5** – Зависимости средней микротвердости мод сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в двухслойном мультимодальном покрытии от шага наплавки валиков

**Заключение.** Исследования, проведенные в рамках данной работы, позволяют понять механизм формирования двухслойных мультимодальных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки. Показана возможность получения периодических изменений микротвердости в поперечном сечении мультимодальных покрытий, в направлении параллельно основе, по глубине покрытия и в плане сверху. Полученные результаты позволяют сделать предположение о периодичности изменения и других физико-механических свойств таких покрытий. Кроме того, можно с достаточной степенью уверенности утверждать, что существует реальная возможность регулирования физико-механических и эксплуатационных свойств, в том числе износостойкости и коэффициента трения в мультимодальных покрытиях, получаемых методом лазерной наплавки.

Изучено также влияние режимов лазерной наплавки на микротвердость мод мультимодального покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Увеличение скорости лазерной наплавки приводит вначале к уменьшению средней микротвердости, а затем к некоторому ее росту. Эта закономерность выполняется как для фазы сплава ПГ-12Н-01, так и для фазы бронзы ПГ-19М-01. В зависимостях средней микротвердости от шага наплавки для обеих фаз имеется диапазон шагов (2,0/1,0 мм – 2,2/1,1 мм), когда величина средней микротвердости практически не изменяется. При дальнейшем увеличении шага наплавки средняя микротвердость фаз мультимодального покрытия уменьшается.

Разработанные мультимодальные покрытия могут найти применение для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях трения с ограниченной смазкой и сухого трения.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings/ J. Ratajski, A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga// Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. – I. 2. – P. 35–45.
2. Gilewicz, A. The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel / A.Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski // Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27–43.
3. Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar // Journal of laser applications. – 1999. – Vol. 11. – P. 64–79.

**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  $n_t = 56; 71; 90; 112$  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.