



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Повышение эффективности концевой алмазной абразивной инструментарии на металлической связке за счет совершенствования технологии изготовления

Валентин Смирнов <sup>1, a</sup>, Дмитрий Лобанов <sup>1, b, \*</sup>, Вадим Скиба <sup>2, c</sup>, Иван Голушов <sup>1, d</sup>

<sup>1</sup> Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, г. Чебоксары, 428015, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2721-9849>, [vms53@inbox.ru](mailto:vms53@inbox.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, [skeeba\\_vadim@mail.ru](mailto:skeeba_vadim@mail.ru), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9757-1368>, [ivan.golyushov.97@mail.ru](mailto:ivan.golyushov.97@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.047

#### История статьи:

Поступила: 14 марта 2021  
 Рецензирование: 27 марта 2021  
 Принята к печати: 14 апреля 2021  
 Доступно онлайн: 15 июня 2021

#### Ключевые слова:

Абразивный инструмент  
 Металлическая связка  
 Сварка конденсаторная  
 Конструкция инструментария  
 Технология

#### Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1\_21.

#### Благодарности:

Исследования выполнены в ЦКП ССМ НГТУ.

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В различных отраслях промышленности все более широкое использование находят труднообрабатываемые материалы с повышенными физико-механическими свойствами. Они применяются в машиностроении для изготовления деталей и узлов машин и механизмов, в производстве и переработке пищевых продуктов, где требуются повышенные эксплуатационные требования. В современном производстве наряду с традиционными методами интенсификации технологических операций применяют комбинированные и гибридные технологии обработки. Для финишной обработки изделий применяется абразивное шлифование алмазным инструментом. Одной из проблем, сдерживающих широкое практическое применение такого метода в промышленности, является высокая себестоимость, вызванная стоимостью используемых при изготовлении материалов и трудоемкостью процесса формообразования инструментария. Это ведет к необходимости разработки новой технологии получения алмазного инструментария. **Цель работы** – повышение эффективности концевой алмазной абразивной инструментарии на металлической связке за счет использования в качестве материала корпуса углеродистых сталей, увеличение прочности соединения между корпусом и алмазосодержащей частью, а также выбор эффективной технологии изготовления инструментария. **Методика исследований.** Для выполнения поставленной задачи нами разработана и испытана технология изготовления концевой алмазной абразивной инструментарии. Применение в качестве материала хвостовика среднеуглеродистых закаленных качественных сталей с твердостью 45...60 HRC позволило использовать технологию конденсаторной сварки для соединения алмазосодержащей части с хвостовиком. Прочность соединения корпуса с рабочей алмазосодержащей частью образцов шлифовальных головок определяли методом испытания на растяжение на разрывной машине 1958У10 с максимальной нагрузкой 100 кН. Качество соединения оценивали визуально по наличию несплошностей в соединении, а также исследованием микроструктуры и измерением микротвердости шва и зон термического влияния. Измерение микротвердости сварного соединения проводили на полуавтоматическом микротвердометре НМV-G21ST (Шимадзу, Япония) при нагрузке 50 г. **Результаты и обсуждение.** Таким образом, результаты сравнительных исследований позволяют утверждать, что прочность соединения между хвостовиком и рабочей алмазосодержащей частью по предлагаемой технологии превосходит аналогичные характеристики прочности соединения между хвостовиком и алмазосодержащим слоем шлифовальных головок, получаемых способом, выбранным прототипом. **Выводы.** Предлагаемая технология изготовления алмазных головок увеличивает прочность соединения между корпусом и алмазосодержащей рабочей частью, снижает затраты на изготовление шлифовальных головок за счет применения закаленных среднеуглеродистых сталей в качестве материала корпуса инструментария взамен быстрорежущих марок сталей, упрощается технология и появляется возможность автоматизации изготовления инструментария.

**Для цитирования:** Повышение эффективности концевой алмазной абразивной инструментарии на металлической связке за счет совершенствования технологии изготовления / В.М. Смирнов, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, И.С. Голушов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 66–80. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-66-80.

## Введение

В условиях современной экономики одним из основополагающих показателей является конкурентоспособность продукции. В машиностроении довольно часто большей конкурентоспособностью обладает продукция, гарантиру-

#### \*Адрес для переписки

Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент  
 Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,  
 пр. Московский, 15,  
 428015, г. Чебоксары, Россия  
 Тел.: +7-908-303-47-45, e-mail: [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru)

ющая повышенные эксплуатационные свойства изделий наряду с высокими качественными характеристиками. Таким критериям в полной мере соответствуют детали из высокопрочных, труднообрабатываемых и наноструктурированных материалов [1–5]. Высокие качественные показатели таких изделий формируются, как правило, на финишных операциях формообразования, среди которых особо выделяется абразивная обработка [6–23]. Однако в силу высоких физико-механических свойств перечисленных конструкционных материалов не все абразивные материалы справляются с этой задачей [24, 25]. Положительные результаты наблюдаются, как правило, при использовании высокопрочных абразивных материалов (например, алмаз или кубический нитрид бора). Кроме того, работоспособность такого инструмента напрямую зависит от связки абразивного инструмента [26]. Органические связки, часто применяемые для обработки высокопрочных материалов, обеспечивают хорошую режущую способность инструмента, но при этом повышают расход дорогостоящего высокопрочного абразива [27]. Круги на металлических связках имеют значительно меньший расход при обработке высокопрочных материалов, но при этом более склонны к потере режущей способности вследствие явления «засаливания» [25, 28, 29]. Наибольшую эффективность алмазные круги на металлических связках обнаруживают при реализации комбинированных методов обработки [24, 29–36]. При этом и алмазоносный слой, и корпус инструмента должны отвечать требованиям токо-, теплопроводности, прочности. Особо актуально это при использовании в качестве инструмента алмазных концевых инструментов (шлифовальных головок). Эксплуатационные характеристики алмазных шлифовальных головок на металлических связках помимо физико-механических свойств алмазоносного слоя определяются также прочностными свойствами корпуса (хвостовика).

Выбор материала корпуса алмазных инструментов зависит также от материала связки [26] и способа прикрепления алмазосодержащего элемента к хвостовику инструмента. Например, алмазные инструменты на органических связках изготавливают напрессовкой алмазоносного слоя на корпус или одновременного прессова-

ния и спекания (полимеризации) порошковой алмазосодержащей шихты и корпуса в штампах. В данном случае температура полимеризации не превышает 200 °С, и в качестве материала корпуса алмазных головок на органических связках в соответствии с рекомендациями ГОСТ 17122–85 можно применять углеродистые инструментальные стали с твердостью до 63 HRC.

В качестве материалов металлических связок алмазного инструмента для обработки изделий из высокопрочных материалов используют широко известные сплавы на основе Cu-Sn и Cu-Al-Zn [26]. Температура спекания алмазоносных элементов на таких металлических связках составляет 600...700 °С. При применении матрично-наполненных материалов на основе меди в качестве связки температура спекания алмазоносной части может достигать до 750 °С [5]. Такие температуры спекания требуют ответственно применения теплостойких сталей для изготовления корпусов (хвостовиков) шлифовальных головок при применении традиционной технологии, когда корпус инструмента соединяется с алмазоносной частью в процессе холодного прессования, спекания и последующего горячего прессования в жаропрочной металлической пресс-форме. Поэтому с целью сохранения высокой твердости и прочности на изгиб корпуса инструмента в процессе спекания и горячего прессования их рекомендуют изготавливать в соответствии с ГОСТ 17122–85 из быстрорежущих инструментальных сталей (ГОСТ 19265–73). Они способны сохранять высокую твердость и прочность при нагревах до 650 °С, причем прочность быстрорежущих сталей на изгиб  $\sigma_{из}$  достигает 3000 МПа. Углеродистые инструментальные стали, например У8, имеют предел прочности на изгиб до 2000 МПа. Сталь 45 в состоянии закалки и низкого отпуска (48 HRC) имеет предел прочности на изгиб равный 1200 МПа [37].

Необходимая прочность на изгиб материала корпуса шлифовальной головки, обеспечивающая безопасные и надежные условия работы алмазного инструмента, определяется силой прижима  $P$  при шлифовании. В соответствии с рекомендациями ГОСТ 17122–85, при шлифовании цилиндрическими алмазными головками типа АW сила прижима составляет 0,4 Н на 1 мм контактообразующей головки, что при

максимальной высоте алмазоносной части головок 20 мм, составляет 8 Н. Такая сила прижима приводит в хвостовике с диаметром 6 мм и длиной вылета 40 мм к появлению в опасном сечении корпуса максимального изгибающего напряжения, равного 15 МПа, что многократно ниже, например, допускаемого напряжения  $[\sigma_{из}] = 270$  МПа для стали 45 после закалки и низкого отпуска при твердости 48 HRC.

Однако применение нетеплостойких инструментальных сталей или углеродистых конструкционных сталей в качестве корпуса шлифовальных алмазных головок на металлических связках требует дополнительной термической обработки, закалки и низкого отпуска готового инструмента, изготовленного по традиционной технологии. Такая конечная операция в технологии изготовления алмазной шлифовальной головки не всегда допустима из-за возможности разупрочнения металлической связки алмазного слоя.

Наиболее перспективным способом соединения закаленного стального корпуса в виде цилиндрического хвостовика с алмазоносной рабочей частью шлифовальной головки, как показали предварительные исследования [38, 39], является метод стыковой конденсаторной сварки, осуществляемый с поджигом дуги и оплавлением соединяемых поверхностей [37]. Этот метод в промышленности находит широкое применение для приварки низкоуглеродистых стальных шпилек диаметром от 2 до 12 мм к тонкостенным корпусным деталям [26]. Применение дополнительной насадки [38] к стандартному пистолету аппарата конденсаторной сварки обеспечивает стыковое сварное соединение цилиндрического корпуса (хвостовика) инструмента с алмазоносной частью с требуемой точностью. С целью увеличения прочности соединения между корпусом и алмазоносной частью авторами [39] предлагается переходной корпус из стали Ст.3, вставляемый в алмазоносную часть при её изготовлении. Авторам [38] удалось показать, что применение метода конденсаторной сварки благодаря высокой плотности энергии и краткости импульса не приводит к разупрочнению основного корпуса, изготовленного из термоупрочненной инструментальной стали У8. Однако, как показывает практика, применение закаленной углеродистой инструментальной

стали У8 в качестве корпуса не всегда обеспечивает стабильность прочностных свойств соединения между хвостовиком и алмазоносной частью, получаемых методом конденсаторной сварки. Общеизвестно [37], что свариваемость сталей ухудшается при увеличении содержания углерода. Это обычно связывают с появлением хрупких структурных составляющих в виде мартенсита и остаточных напряжений в сварном соединении. Поэтому представляет практический интерес исследование возможности применения среднеуглеродистых конструкционных сталей в качестве корпуса алмазных шлифовальных головок, которые после закалки и низкого отпуска, как было показано выше, обладают достаточным пределом прочности на изгиб.

**Цель работы** – повышение эффективности концевого алмазного абразивного инструмента на металлической связке за счет использования в качестве материала корпуса углеродистых сталей, увеличение прочности соединения между корпусом и алмазоносной частью, а также упрощение технологии изготовления инструмента.

### Методика исследований

Предлагаемым способом повышения эффективности изготовления алмазного концевого инструмента, как уже было отмечено, является применение для соединения корпуса из закаленной углеродистой стали с алмазоносной рабочей частью шлифовальной головки метода стыковой конденсаторной сварки с поджигом дуги и оплавлением соединяемых поверхностей [37]. Преимуществами конденсаторного метода сварки являются: минимальная зона термического влияния за счёт высокой плотности энергии и краткости импульса (1...3 мс); прочность соединения; высокая производительность, простота технологии и возможность автоматизации [40]. При этом расплавляемый поверхностный слой не превышает 0,2 мм [37]. Соответственно стальной закаленный хвостовик в процессе приваривания к рабочему алмазоносному слою инструмента не будет терять практически свои прочностные характеристики, тем более в области действия максимальных изгибных напряжений в ходе эксплуатации инструмента.

Процесс конденсаторной приварки цилиндрического корпуса к алмазоносной части ин-

струмента рекомендуется осуществлять импульсной дугой с использованием пистолетов, оснащенных пружинным механизмом для поджатия свариваемых поверхностей. Выпускаемые промышленностью сварочные аппараты, например, обеспечивают соединение подобных шпилек от 2 до 12 мм. Обязательным условием является наличие в основании одного из привариваемых элементов осевого контактного выступа в виде цилиндра с диаметром от 0,6 до 0,75 мм и высотой от 0,55 до 0,75 мм [41]. Это служит двум основным целям:

- позволяет путем нанесения предварительной центральной разметки определить точное место приварки элемента на поверхности корпуса;
- обеспечивает зажигание сварочной дуги и устойчивое горение по всей поверхности привариваемого элемента при осуществлении разряда конденсатора.

Для обеспечения высокой прочности соединения между корпусом и рабочей частью алмазной шлифовальной головки в настоящей работе используется переходная стальная вставка 3 (рис. 1) в виде винтовой шпильки с контактным концом типа РТ (ГОСТ Р 55738–2013 (ИСО 13918:2008) и высотой не более 2/3 от высоты рабочей части головки. При изготовлении рабочей алмазонасной части такая шпилька устанавливается в пресс-форму вдоль ее оси и фиксируется в этом положении своим контактным концом в отверстии торца нижнего пуансона пресс-инструмента для холодного прессования. Затем готовая алмазонасная порошковая смесь засыпается в пресс-форму и подвергается холодному прессованию при давлении 300...400 МПа. Готовый алмазонасный брикет со вставкой в виде винтовой шпильки извлекается из формы и спекается в вакууме или в защитной среде при температуре 700 °С. Процесс изготовления алмазонасного рабочего слоя со вставкой завершается горячим прессованием (уплотнением) в жаропрочном пресс-инструменте при давлении не более 300 МПа и температуре не более 500 °С. Далее готовый инструмент выпрессовывается из формы. Для удобства реализации процесса горячей допрессовки холоднопрессованный брикет изготавливают по диаметру на 0,5...1,0 мм меньше, чем диаметр готовой рабочей части алмазной головки.

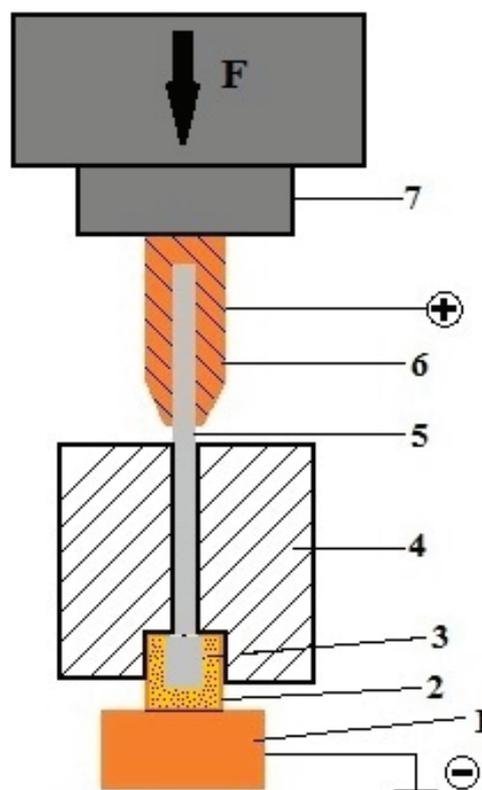


Рис. 1. Схема конденсаторной приварки стального хвостовика к рабочей части:

1 – нижний медный электрод; 2 – рабочая алмазонасная часть; 3 – переходный корпус – стальная вставка в виде винтовой шпильки с контактным выступом; 4 – соединительная диэлектрическая муфта; 5 – цилиндрический корпус (хвостовик); 6 – цанговый захват сварочного пистолета; 7 – сварочный пистолет

Fig. 1. Scheme of capacitor welding of a steel shank to the working part:

1 – lower copper electrode; 2 – working diamond-bearing part; 3 – steel insert in the form of a screw pin with a contact ledge; 4 – dielectric coupling; 5 – cylindrical body (shank); 6 – collet grip of the welding gun; 7 – welding gun

Приваривание корпуса шлифовальной головки из закаленной стали к рабочей алмазонасной части инструмента способом конденсаторной стыковой сварки включает следующие операции. Предварительно очищают и обезжиривают свариваемые поверхности. Включают сварочный аппарат. Закаленный хвостовик 5 вставляют, как показано на рис. 1, в цангу сварочного пистолета 6. Рабочую часть алмазной головки 2 устанавливают в соединительную муфту 4 снизу, причем со стальной вставкой 3 и с контактным выступом вверх. Соединительную муфту со

вставленной рабочей частью алмазной головки упирают в медную пластину-электрод 1. Форма поверхности электрода определяется формой рабочей части головки. Сварочный пистолет 7 с закрепленным хвостовиком вставляют в муфту так, чтобы торец хвостовика касался контактного выступа рабочей головки, затем надавливают на рукоятку пистолета до тех пор, пока пружина не перестанет сжиматься. В последнюю очередь нажимают на кнопку разряда на сварочном пистолете.

Для изготовления экспериментальных образцов алмазных шлифовальных головок типа АW описанным выше способом, например диаметром 12 мм и высотой 12 мм (ГОСТ 17122), использовались цилиндрические корпуса (хвостовики) диаметром 6 мм и длиной 68 мм из разных марок закаленных углеродистых сталей 35, 45, 60 и У8. Закалка на максимальную твердость хвостовиков из стали 35 и 45 проводилась в воде, а из стали 60 и У8 – в масле.

Рабочая алмазоносная часть всех головок изготавливалась на металлической связке М2-01 со 100%-й концентрацией алмазного порошка марки АС32 160/125 (ГОСТ 9206-80) по вышеописанной технологии изготовления. В качестве переходного корпуса 3, размещаемого по центру алмазоносной рабочей части (рис. 1), использовались готовые омедненные винтовые шпильки М6 с контактным концом типа РТ (ГОСТ Р 55738-2013 (ИСО 13918:2008) и длиной 8 мм. Такие стальные шпильки класса прочности 4,8 (ГОСТ ИСО 898-1-2014) имеют предел прочности не менее 400 МПа и условный предел текучести не менее 320 МПа. По химическому составу близки к сталям Ст.3 (или Ст.4).

Конденсаторную приварку корпусов из закаленных углеродистых сталей диаметром 6 мм к торцу переходного корпуса рабочей алмазоносной части выполняли на сварочном аппарате для конденсаторной сварки модели STC-2500 в последовательности, описанной выше. Рекомендуемое производителем напряжение зарядки конденсаторов для приварки стальных шпилек диаметром 6 мм к стальному корпусу составляет 100... 120 В. Исследуемые образцы алмазных головок, представленные на рис. 2, были соединены с закаленным стальным корпусом по вышеописанной технологии при напряжении зарядки конденсаторов 110 В.

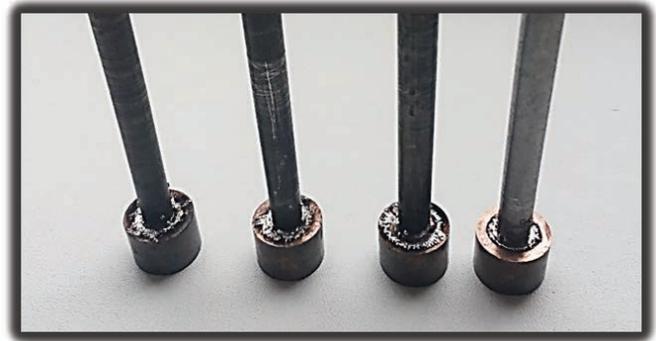


Рис. 2. Экспериментальные образцы алмазных головок с диаметром 12 мм, изготовленные с применением метода конденсаторной сварки

Fig. 2. Experimental samples of diamond heads with a diameter of 12 mm, made using the method of capacitor welding

В дальнейшем для снятия остаточных напряжений в сварном соединении исследуемые алмазные шлифовальные головки, соединенные с хвостовиком с использованием метода конденсаторной сварки, подвергались отпуску при температуре  $240 \pm 10$  °С в течение 1,5 ч.

Качество соединения оценивали визуально по наличию несплошностей в соединении, а также исследованием микроструктуры и измерением микротвердости шва и зон термического влияния. Измерение микротвердости сварного соединения проводили на полуавтоматическом микротвердомере НМV-G21ST (Шимадзу, Япония) при нагрузке 50 г.

Прочность соединения корпуса с рабочей алмазоносной частью образцов шлифовальных головок определяли методом испытания на растяжение на разрывной машине 1958У10 с максимальной нагрузкой 100 кН.

## Результаты и их обсуждение

Подбор режима конденсаторной сварки проводили визуальным путем по внешнему виду сварного соединения. При напряжениях более 110 В наблюдалось значительное разбрызгивание жидкого металла из сварного шва, а при меньших напряжениях, наоборот, недостаточное расплавление поверхностей свариваемых изделий и образование пустот по краям сварного соединения между основным и переходным корпусами.

Как известно [37], конденсаторная сварка позволяет получать достаточно прочные соедине-

ния между разнородными металлическими материалами из-за малой толщины оплавленного слоя и отсутствия перемешивания разнородных металлов из-за малости промежутка времени горения дуги. Однако при сварке изделий из углеродистых сталей наиболее прочные и надежные соединения в случае конденсаторной стыковой сварки с поджигом дуги и оплавлением соединяемых поверхностей формируются в том случае, когда соединяемые изделия изготовлены из низкоуглеродистых сталей [37, 42]. Увеличение содержания углерода в свариваемых изделиях ведет к снижению прочностных свойств, что обычно связывается появлением в сварном соединении хрупких структурных составляющих в виде мартенсита и остаточных напряжений. Тем более, как показывают результаты моделирования и экспериментальные данные, полученные авторами [43], не удается полностью избежать образования пустот в области сварного шва при конденсаторной сварке оплавлением. Действительно, как видно из фотографии продольного макротемплета (рис. 3), вырезанного из исследуемой алмазной шлифовальной головки, в области сварного соединения имеются несплошности, достигающие в нашем случае  $0,15 \times 0,5$  мм. Наличие несплошностей и остаточных напряжений в сварном шве является одной из причин низкой прочности сварного соединения между цилиндрическим корпусом из закаленных углеродистых сталей и переходным корпусом из низкоуглеродистой стали. Например, прочность соединения корпуса из закаленной стали 45 с переходным корпусом из низкоуглеродистой стали ст.3 не превышает 300 МПа, и разрушение обычно происходит хрупко по сварному шву. Поэтому с целью снятия остаточных напряжений и повышения сопротивления к хрупкому разрушению исследуемые шлифовальные головки после конденсаторной приварки закаленного корпуса подвергались низкому отпуску при температуре 240 °С 2 ч.

Результаты испытаний на прочность соединения хвостовика с алмазоносной частью при растяжении исследуемых образцов шлифовальных головок приведены в таблице. Наименьшую прочность соединения на растяжение имеют алмазные шлифовальные головки, изготовленные с использованием традиционной технологии, так как в этом случае часть корпуса (хво-

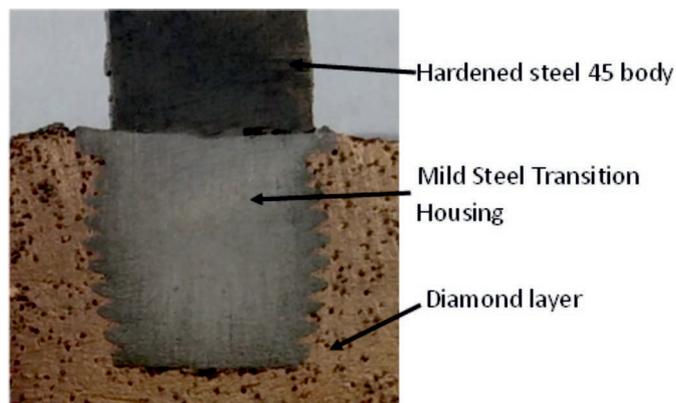


Рис. 3. Макроструктура области сварного соединения исследуемой алмазной шлифовальной головки  
 Fig. 3. The macrostructure of the welded joint area of the investigated diamond grinding head

стовика), находящаяся внутри алмазоносного слоя, имеет гладкую поверхность, и прочность соединения обеспечивается только за счет сил сцепления, формирующихся между омедненной поверхностью корпуса и металлической связкой в результате спекания и горячего прессования.

Исследуемые алмазные шлифовальные головки, соединяемые с корпусом из закаленных углеродистых сталей с использованием метода конденсаторной сварки, обладают более высокой прочностью на растяжение между корпусом и алмазоносной частью, чем алмазные головки, соединяемые с корпусом из стали Р6М5, по традиционной технологии в результате спекания и горячего прессования. Такая разница в прочности соединения обусловлена тем, что при изготовлении исследуемых алмазных головок по предлагаемому нами способу в алмазоносный слой запрессовывается омедненная стальная винтовая шпилька 3 (рис. 1), которая обеспечивает как значительное механическое сцепление алмазоносным слоем, так и большее межатомное сцепление за счет большей поверхности диффузионного припекания к металлической связке.

Наибольшие значения прочности соединения, обеспечиваемые конденсаторной приваркой корпуса к рабочей алмазоносной части, наблюдаются в шлифовальных головках с хвостовиками, изготовленными из среднеуглеродистых марок стали 35 и стали 45. Предел прочности соединения между корпусом из закаленной стали 45 и шпилькой М6, запрессованной в алмазоносную часть, составляет 500 МПа, а предел прочности соединения между корпусом из зака-

**Зависимость прочности соединения хвостовика Ø 6 мм с рабочим алмазоносным слоем шлифовальной головки Ø 12 мм от способа соединения и материала корпуса**

**Dependence of the strength of the connection of the shank 6 mm with the working diamond layer of the grinding head 12 mm on the connection method and body material**

| Способ соединения корпуса к рабочему алмазоносному слою                                     | Материал корпуса                    | Твердость корпуса после закалки и отпуска, HRC | Предел прочности соединения корпуса с рабочей частью $\sigma_b$ , МПа | Примечание   |
|---|-------------------------------------|--|---|--|
| Традиционная технология диффузионного припекания  | Быстрорежущая сталь P6M5 (прототип) | 62(55*)  | 200±20  | Отрыв между корпусом и рабочей алмазоносной частью |
| Способ конденсаторной приварки с использованием переходного корпуса                         | Сталь У8                            | 62(56)   | 350±35  | Разрыв по сварному шву                             |
|   | Сталь 60                            | 61(55)   | 400±36  | Разрыв по сварному шву                             |
|   | Сталь 45                            | 54(48)   | 500±30  | Разрыв по сварному шву                             |
|   | Сталь 35                            | 45(42)   | 520±35  | Разрыв по сварному шву                             |
| * Твердость корпуса из стали P6M5 после процесса спекания и горячего прессования при 700 °С |                                     |  |   |  |

ленной стали 35 и шпилькой М6 – 520 МПа. При этом немаловажно, что прочность соединения между корпусом и алмазоносной частью в этих шлифовальных головках не ниже предела прочности переходного корпуса, представляющего собой приварочную шпильку класса прочности 4,8, которая, как было отмечено выше, в соответствии с требованиями ГОСТ должна иметь предел прочности не ниже 400 МПа.

Как видно из таблицы, разрушение при растяжении исследуемых шлифовальных головок, изготовленных с применением метода конденсаторной сварки с оплавлением, происходит в области сварного шва. Измерения микротвердости области сварного соединения хвостовика из стали 45 с переходным корпусом в виде винтовой шпильки показывают (рис. 4), что материал винтовой шпильки имеет микротвердость 200 HV 0,05, а корпус (хвостовик) инструмента из стали 45 после закалки и отпуска имеет 500 HV 0,05. Толщина области сварного соединения, включая зону термического влияния, где происходит уменьшение твердости корпуса инструмента (рис. 4), составляет 0,3...0,4 мм.

Работоспособность исследуемых шлифовальных головок с хвостовиком из термоупрочненной стали 45 проверялось сравнительными испытаниями их при обработке пластин из твердого сплава T15K6 на фрезерно-гравировальном станке модели «CARVER Mini-0609». Испытания проводились при следующих режимах:

- частота вращения головки 24 000 об/мин;
- глубина резания 0,04 мм на двойной ход;
- скорость продольной подачи 0,5 м/мин;
- длина хода головки 15 мм;
- продолжительность испытаний 60 мин;
- без применения СОЖ.

Все исследуемые образцы шлифовальных головок в количестве 3 шт. с хвостовиком из термообработанной среднеуглеродистой стали 45, изготовленные по вышеописанной технологии с применением конденсаторной сварки, и одна шлифовальная головка с хвостовиком из стали P6M5, изготовленная по традиционной технологии, данные испытания выдержали, сохранив дальнейшую работоспособность.

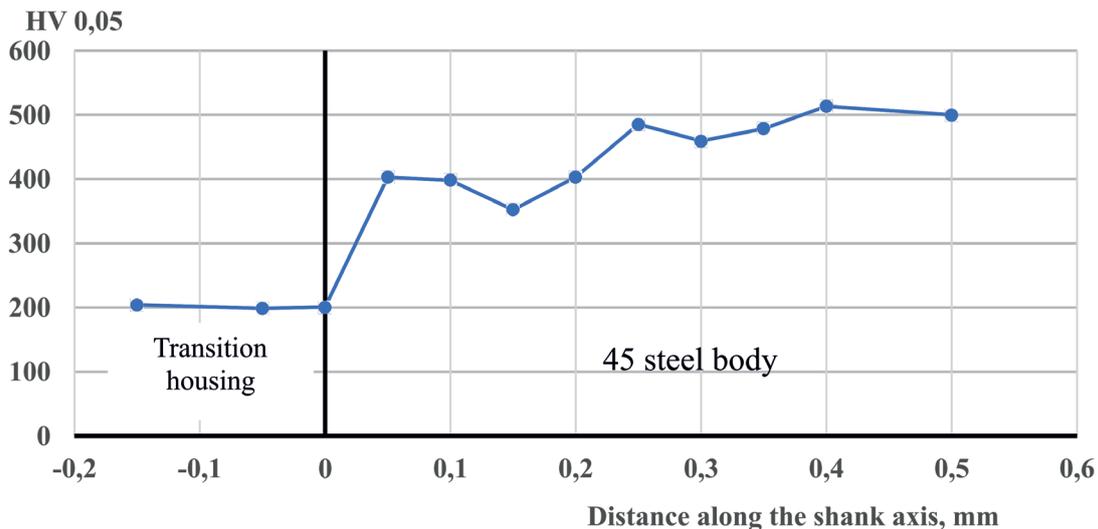


Рис. 4. Изменение микротвердости в области сварного соединения корпуса с переходным корпусом алмазной головки

Fig. 4. Change in microhardness in the area of the welded joint of the body with the transition body of the diamond grinding head

## Выводы

Таким образом, результаты сравнительных исследований позволяют утверждать, что прочность соединения между хвостовиком и рабочей алмазоносной частью по предлагаемой технологии превосходят аналогичные характеристики прочности соединения между хвостовиком и алмазоносным слоем шлифовальных головок, получаемых по традиционной технологии соединения.

Предлагаемая технология изготовления алмазных головок увеличивает прочность соединения между корпусом и алмазоносной рабочей частью, снижает затраты на изготовление шлифовальных головок за счет применения закаленных среднеуглеродистых сталей в качестве материала корпуса инструмента взамен быстрорежущих марок сталей, а также упрощается технология и появляется возможность автоматизации изготовления инструмента.

Сравнительные эксплуатационные испытания шлифовальных головок показывают соотносимый с традиционными инструментами ресурс работы. Это свидетельствует о возможности применения среднеуглеродистых закаленных сталей с твердостью 45...55 HRC в качестве материала хвостовика.

Все это свидетельствует о возможности применения среднеуглеродистых закаленных ка-

чественных сталей с твердостью 45..55 HRC в качестве материала хвостовика и использования предлагаемой технологии изготовления алмазных шлифовальных головок на металлической связке, что позволит увеличить прочность соединения корпуса с алмазоносной рабочей частью и снизить расходы и упростить технологические процессы изготовления инструмента, тем самым повысить эффективность концевой алмазной абразивного инструмента.

## Список литературы

1. Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П. Разработка жаро- и износостойкого нано-композиционного материала на основе порошковой меди и технологии его изготовления для поршней машин литья под давлением // Новые материалы и перспективные технологии: сборник материалов 4-го междисциплинарного научного форума. – М.: Буки Веди, 2018. – Т. 1. – С. 106–110.
2. Патент 2195511 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 22 С 9/01, 1/10 С2. Дисперсно-упрочненный композиционный материал для электроконтактных деталей / Шалунов Е.П., Матросов А.Л., Липатов Я.М., Берент В.Я. – № 2001103228/02; заявл. 05.02.2001; опубл. 27.12.2002.
3. Шалунов Е.П. Наноструктурные материалы на основе порошковой меди // Литейщик России. – 2016. – № 2. – С. 37–40.
4. Hard-alloy metal-cutting tool for the finishing of hard materials / D.S. Rechenko, A.Y. Popov, D.Y. Be-

lan, A.A. Kuznetsov // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37. – N 2. – P. 148–149. – DOI: 10.3103/S1068798X17020162.

5. *Smirnov V.M., Shalunov E.P.* The possibilities of creation and the prospects of application of a binder with the matrix-filled structure “tin bronze – the mechanically alloyed granules” for production of diamond tools // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 11, pt. 1. – P. 270–275. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.142.

6. Исследование и внедрение в производство работ по внутреннему шлифованию глубоких отверстий / Д.П. Салова, Т.Г. Виноградова, М.В. Купцов, Д.А. Юрпалов, И.С. Спиридонова // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции. – Самара, 2017. – С. 33–35.

7. *Bratan S., Vladetskaya E., Kharchenko A.* Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01083. – DOI: 10.1051/mateconf/201712901083.

8. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process / S. Bratan, A. Kolesov, S. Roshchupkin, T. Stadnik // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01078. – DOI: 10.1051/mateconf/201712901078.

9. *Бржозовский Б.М., Захаров О.В.* Обеспечение технологической надежности при бесцентровой абразивной обработке: монография. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. – 216 с. – ISBN 978-5-7433-2220-6.

10. Probing the effect of abrasive wear on the grinding performance of rail grinding stones / W. Zhang, Ch. Liu, Y. Yuan, P. Zhang, X. Fan, M. Zhu // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 64. – P. 493–507. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.014.

11. *Nosenko V.A., Nosenko S.V.* Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep feed grinding of horizontal surface by circle of direct profile // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2010. – Vol. 39, N 4. – P. 380–385. – DOI: 10.3103/S1052618810040138.

12. Интегральная обработка как эффективное направление решения задачи перехода к ресурсосберегающим технологиям / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцовский, Н.П. Зуб, С.В. Туревич // Инновационная деятельность. – 2010. – № 10-1. – С. 66–69.

13. *Li H.N., Axinte D.* On the inverse design of discontinuous abrasive surface to lower friction-induced temperature in grinding: an example of engineered abrasive tools // International Journal of Machine Tools

and Manufacture. – 2018. – Vol. 132. – P. 50–63. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.04.006.

14. Grinding performance and wear of metal bond super-abrasive tools in grinding of Zr-based bulk metallic glass / F.-L. Zhang, G.-W. Huang, J.-M. Liu, Z.-J. Du, S.-X. Wu, C.-Y. Wang // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 97. – P. 105501. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105501.

15. *Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Пушкин В.Н.* Методика назначения режимов обработки при совмещении операций абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 4 (53). – С. 19–25.

16. A strategy on generating structured plateau surface by the sinusoidal oscillatory lapping of the grinding wheel with the phyllotactic pattern of abrasive grains / Y. Lyu, Y. Liu, X. Li, H. Di, H. Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 65. – P. 435–444. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.03.010.

17. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors / R.X. Wang, K. Zhou, J.Y. Yang, H.H. Ding, W.J. Wang, J. Guo, Q.Y. Liu // Wear. – 2020. – Vol. 454–455. – P. 20332. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203332.

18. *Shekhar M., Yadav S.K.S.* Diamond abrasive based cutting tool for processing of advanced engineering materials: a review // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 22, pt. 4. – P. 3126–3135. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.449.

19. Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: a review / V. Pandiyan, S. Shevchik, K. Wasmer, S. Castagne, T. Tjahjowidodo // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 57. – P. 114–135. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.013.

20. Developing a machining strategy for hard-alloy polyhedral inserts on cnc grinding and sharpening machines / E.V. Vasil’ev, A.Y. Popov, A.A. Lyashkov, P.V. Nazarov // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, N 8. – P. 642–644. – DOI: 10.3103/S1068798X18080166.

21. Grinding of Ti<sub>2</sub>AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels: tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality / X. Xi, T. Yu, W. Ding, J. Xua // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 53. – P. 134–145. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.03.007.

22. *Roshchupkin S., Bratan S., Novosyolov Yu.* Modeling of cutting forces in diamond drilling // International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies. – 2015. – N 2. – P. 59–63.

23. Grinding force and surface quality in creep feed profile grinding of turbine blade root of nickel-based superalloy with microcrystalline alumina abrasive wheels / Q. Miao, W. Ding, W. Kuang, Ch. Yang // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2021. – Vol. 34, iss. 2. – P. 576–585. – DOI: 10.1016/j.cja.2019.11.006.
24. Зорина М.М. Выбор материала круга для электрохимической обработки безвольфрамовых твердых сплавов // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2018. – № 9–1. – С. 65–66.
25. Probabilities of abrasive tool grain wearing during grinding / V.A. Nosenko, E.V. Fedotov, S.V. Nosenko, M.V. Danilenko // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2009. – Vol. 38, N 3. – P. 270–276. – DOI: 10.3103/S1052618809030108.
26. Галицкий В.Н., Курищук А.В., Муровский В.А. Алмазно-абразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали. – Киев: Наукова думка, 1986. – 144 с.
27. Шлифование труднообрабатываемых материалов кругами на связке Б156 / П.М. Салов, Д.П. Салова, Н.В. Мулюхин, В.В. Плотников // *Материалы II международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве»*. – Чебоксары, 2016. – С. 285–288.
28. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Н.П. Петров, Д.А. Рычков // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. – 2013. – Т. 1. – С. 146–149.
29. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.
30. Борисов М.А., Мишин В.А., Дементьев Д.А. Разработка программируемого устройства для управления параметрами тока при электрохимической обработке // *Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение»*. – Чебоксары, 2017. – С. 188–192.
31. Борисов М.А., Мишин В.А. Аспекты применения электрохимического шлифования зубопротезных металлических изделий // *Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы: материалы международной научно-практической конферен-*
- ции «Наука – Общество – Технологии – 2017». – М., 2017. – С. 157–159.
32. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // *Решетневские чтения*. – 2014. – Т. 1. – С. 306–308.
33. Bratan S., Roshchupkin S., Revenko D. Probabilistic approach for modeling electroerosion removal of grinding wheel bond // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1426–1431. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.656.
34. Research of influence electric conditions combined electro-diamond processing by on specific consumption of wheel / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebea // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 142. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
35. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step “diamond smoothing” / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeebea, D.V. Lobanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 125. – P. 012031. – DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
36. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebea // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.
37. O'Brien R.L. *Welding handbook*. Vol. 2. *Welding processes*, pt. 1. – 9th ed. – American Welding Society, 2004. – 720 p. – ISBN 0871717298. – ISBN 978-0871717290.
38. Голушов И.С., Смирнов В.М., Цай В.Н. О возможности применения конденсаторной сварки для соединения стального хвостовика с алмазной головкой на наноструктурированных медных связках // *Материалы IV международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве» (Чебоксары, 18–19 декабря 2018 г.)*. – Чебоксары, 2018. – С. 475–481.
39. Голушов И.С., Смирнов В.М. О применении конденсаторной сварки в технологии изготовления алмазных головок на наноструктурированных медных связках // *Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых ученых (Севастополь,*

20–23 мая 2019 г.). – Севастополь, 2019. – Электронное издание № 195/19. – С. 66–72.

40. Study of weld strength variability for capacitor discharge welding process automation / B.K. Paul, D.D. Wilson, E. McDowell, J. Benjarattananon // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2001. – Vol. 6, iss. 2. – P. 109–115. – DOI: 10.1179/136217101101538613.

41. Characterization of steel welded joints with hybrid projection and capacitor discharge welding (CDW) processes / F. Palano, S. Chiozzi, F.W. Panella, V. Dattoma // *Materials and Manufacturing Processes*. –

2012. – Vol. 27, iss. 12. – P. 1387–1391. – DOI: 10.1080/10426914.2012.663140.

42. Magda A., Burcal M., Lego M. Research regarding capacitor discharge stud welding with tip ignition on galvanized thin sheets // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 416. – P. 012015. – DOI: 10.1088/1757-899X/416/1/012015.

43. Oh H.S., Lee J.H., Yoo C.D. Simulation of capacitor discharge stud welding process and void formation // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2007. – Vol. 12, iss. 3. – P. 274–281. – DOI: 10.1179/174329307X166803.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov -

# Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Improving the efficiency of metal-bonded diamond abrasive end tools by improving manufacturing technology

Valentin Smirnov<sup>1, a</sup>, Dmitry Lobanov<sup>1, b, \*</sup>, Vadim Skeeba<sup>2, c</sup>, Ivan Golyushov<sup>1, d</sup>.

<sup>1</sup> I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2721-9849>,  [vms53@inbox.ru](mailto:vms53@inbox.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>,  [lobanovdv@list.ru](mailto:lobanovdv@list.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  [skeeba\\_vadim@mail.ru](mailto:skeeba_vadim@mail.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9757-1368>,  [ivan.golyushov.97@mail.ru](mailto:ivan.golyushov.97@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 14 March 2021

Revised: 27 March 2021

Accepted: 14 April 2021

Available online: 15 June 2021

#### Keywords:

Abrasive tools

Metal bond

Condenser welding

Tool design

Technology

#### Funding:

This work was financially supported within the framework of the NSTU Research and Development Thematic Plan (project No. TP-PTM-1\_21 project).

#### Acknowledgements:

The studies were performed at the Collective use center "Structure, mechanical and physical properties of materials" NSTU for help in conducting joint research work.

### ABSTRACT

**Introduction.** Difficult-to-machine materials with enhanced physical and mechanical properties are increasingly being used in various industries. Such materials are used in mechanical engineering for the manufacture of parts and assemblies of machines and mechanisms, in the production and processing of food products where increased operational requirements are required. In modern production, along with traditional methods of intensifying technological operations, combined and hybrid processing technologies are used. For the finishing of products, abrasive grinding with a diamond tool is used. One of the problems hindering the wide practical application of this method in industry is the fact that it has a high prime cost caused by the cost of materials used in the manufacture and the laboriousness of the tool shaping process. This leads to the need to develop a new technology for manufacturing diamond tools. **The purpose of the work** is to increase the efficiency of the end diamond abrasive tool with a metal bond by using carbon steels as a body material, increasing the strength of the connection between the body and the diamond-bearing part, as well as choosing an effective tool manufacturing technology. **Research methodology.** To gain this task, a technology for manufacturing end diamond abrasive tools is developed and tested. Allowing using the technology of capacitor welding to connect the diamond-bearing part with the shank and use medium-carbon hardened high-quality steels with a hardness of 45-60 HRC as the shank material. The strength of the connection of the body with the working diamond-bearing part of the grinding head samples is determined by tensile testing on a 1958U10 tensile machine with maximum load 100 kN. The quality of the joint is assessed visually by the presence of discontinuities in the joint, as well as by examining the microstructure and measuring the microhardness of the weld and heat-affected zones. The microhardness of the welded joint is measured using an HMV-G21ST semi-automatic microhardness tester (Shimadzu, Japan) at a load of 50 g. **Results and discussion.** Thus, the results of comparative studies allow us to assert that the strength of the connection between the shank and the working diamond-bearing part according to the proposed technology surpasses similar characteristics of the strength of the connection between the shank and the diamond-bearing layer of grinding heads obtained by the method selected by the prototype. **Conclusions.** The proposed technology for the manufacture of diamond heads increases the strength of the connection between the body and the diamond-bearing working part, reduces the cost of manufacturing the grinding heads due to the use of hardened medium-carbon steels as the material of the tool body instead of high-speed steel grades, the technology is simplified and the possibility of automating the manufacture of tools appears.

**For citation:** Smirnov V.M., Lobanov D.V., Skeeba V.Yu., Golyushov I.S. Improving the efficiency of metal-bonded diamond abrasive end tools by improving manufacturing technology. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 66–80. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-66-80. (In Russian).

## References

1. Vladimirova Yu.O., Shalunov E.P. [Development of heat- and wear-resistant nano-composite material based on powdered copper and its manufacturing technology for pistons of injection molding machines]. *Novye materialy i perspektivnye tekhnologii: sbornik materialov 4-go mezhdistsiplinarnogo nauchnogo foruma* [Proceedings of the 4th

#### \* Corresponding author

Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor  
 I.N. Ulianov Chuvash State University,  
 15 Moskovsky Prospekt,  
 428015, Cheboksary, Russian Federation  
 Tel.: + 7-908-303-47-45, e-mail: lobanovdv@list.ru

Interdisciplinary Scientific Forum “New materials and advanced technologies”]. Moscow, 2018, vol. 1, pp. 106–110. (In Russian).

2. Shalunov E.P., Matrosov A.L., Lipatov Ya.M., Berent V.Ya. *Dispersno-uprochnennyyi kompozitsionnyi material dlya elektrokontaknykh detalei* [Dispersion-strengthened composite material for electric contact parts]. Patent RF, no. 2195511, 2002.

3. Shalunov E.P. Nanostrukturnye materialy na osnove poroshkovoi medi [Nanostructured materials based on powder copper]. *Liteishchik Rossii = Foundrymen of Russia*, 2016, no. 2, pp. 37–40.

4. Rechenko D.S., Popov A.Y., Belan D.Y., Kuznetsov A.A. Hard-alloy metal-cutting tool for the finishing of hard materials. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 148–149. DOI: 10.3103/S1068798X17020162.

5. Smirnov V.M., Shalunov E.P. The possibilities of creation and the prospects of application of a binder with the matrix-filled structure “tin bronze – the mechanically alloyed granules” for production of diamond tools. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 11, pt. 1, pp. 270–275. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.12.142.

6. Salova D.P., Vinogradova T.G., Kuptsov M.V., Yurpalov D.A., Spiridonova I.S. [Research and implementation in production of developments on internal grinding of deep holes]. *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy XVI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proceedings of the XVI All-Russian scientific and technical conference “High technologies in mechanical engineering”], Samara, 2017, pp. 33–35. (In Russian).

7. Bratan S., Vladetskaya E., Kharchenko A. Improvement of quality of details at round grinding in the conditions of a floating workshop. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01083. DOI: 10.1051/mateconf/201712901083.

8. Bratan S., Kolesov A., Roshchupkin S., Stadnik T. Theoretical-probabilistic model of the rotary belt grinding process. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01078. DOI: 10.1051/mateconf/201712901078.

9. Brzhozovskii B.M., Zakharov O.V. *Obespechenie tekhnologicheskoi nadezhnosti pri bestsentrovoy abrazivnoi obrabotke* [Provision of technological reliability with centerless abrasive processing]. Saratov, 2010. 216 p. ISBN 978-5-7433-2220-6.

10. Zhang W., Liu Ch., Yuan Y., Zhang P., Fan X., Zhu M. Probing the effect of abrasive wear on the grinding performance of rail grinding stones. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 64, pp. 493–507. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.014.

11. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep feed grinding of horizontal surface by circle of direct profile. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2010, vol. 39, pp. 380–385. DOI: 10.3103/S1052618810040138.

12. Skeebe V.Yu., Ivancivskiy V.V., Zub N.P., Turevich S.V. Integral'naya obrabotka kak effektivnoe napravlenie resheniya zadachi perekhoda k resursoberegayushchim tekhnologiyam [Integrated processing as an effective direction of the decision problems of transition to alternative technologies]. *Innovatsionnaya deyatel'nost' = Innovative Activities*, 2010, no. 10-1, pp. 66–69.

13. Li H.N., Axinte D. On the inverse design of discontinuous abrasive surface to lower friction-induced temperature in grinding: an example of engineered abrasive tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, vol. 132, pp. 50–63. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.04.006.

14. Zhang F.-L., Huang G.-W., Liu J.-M., Du Z.-J., Wu S.-X., Wang C.-Y. Grinding performance and wear of metal bond super-abrasive tools in grinding of Zr-based bulk metallic glass. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 97, p. 105501. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105501.

15. Ivancivsky V.V., Skeebe V.Yu., Pushnin V.N. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki pri sovmeshchenii operatsii abrazivnogo shlifovaniya i poverkhnostnoi zakalki TVCh [Methods of appointment processing conditions when combining the operations of abrasive grinding and surface induction hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4 (53), pp. 19–25.

16. Lyu Y., Liu Y., Li X., Di H., Wang H. A strategy on generating structured plateau surface by the sinusoidal oscillatory lapping of the grinding wheel with the phyllotactic pattern of abrasive grains. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 65, pp. 435–444. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.03.010.

17. Wang R.X., Zhou K., Yang J.Y., Ding H.H., Wang W.J., Guo J., Liu Q.Y. Effects of abrasive material and hardness of grinding wheel on rail grinding behaviors. *Wear*, 2020, vol. 454–455, p. 20332. DOI: 10.1016/j.wear.2020.20332.

18. Shekhar M., Yadav S.K.S. Diamond abrasive based cutting tool for processing of advanced engineering materials: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 22, pt. 4, pp. 3126–3135. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.449.

19. Pandiyan V., Shevchik S., Wasmer K., Castagne S., Tjahjowidodo T. Modelling and monitoring of abrasive finishing processes using artificial intelligence techniques: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 57, pp. 114–135. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.06.013.

20. Vasil'ev E.V., Popov A.Y., Lyashkov A.A., Nazarov P.V. Developing a machining strategy for hard-alloy polyhedral inserts on cnc grinding and sharpening machines. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 8, pp. 642–644. DOI: 10.3103/S1068798X18080166.
21. Xi X., Yu T., Ding W., Xua J. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels: tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality. *Precision Engineering*, 2018, vol. 53, pp. 134–145. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.03.007.
22. Roshchupkin S., Bratan S., Novosyolov Yu. Modeling of cutting forces in diamond drilling. *International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies*, 2015, no. 2, pp. 59–63.
23. Miao Q., Ding W., Kuang W., Yang Ch. Grinding force and surface quality in creep feed profile grinding of turbine blade root of nickel-based superalloy with microcrystalline alumina abrasive wheels. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, vol. 34, iss. 2, pp. 576–585. DOI: 10.1016/j.cja.2019.11.006.
24. Zorina M.M. Vybora materiala kruga dlya elektrokhimicheskoi obrabotki bezvol'framovykh tverdykh splavov [Selection of the material of the grinding circle for electrochemical processing solid alloys without tungsten]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2018, no. 9-1, pp. 65–66.
25. Nosenko V.A., Fedotov E.V., Nosenko S.V., Danilenko M.V. Probabilities of abrasive tool grain wearing during grinding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2009, vol. 38, no. 3, pp. 270–276. DOI: 10.3103/S1052618809030108.
26. Galitskii V.N., Kurishchuk A.V., Murovskii V.A. *Almazno-abrazivnyi instrument na metallicheskih svyazkakh dlya obrabotki tverdogo splava i stali* [Diamond-abrasive tool on metal bonds for processing hard alloy and steel]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 144 p.
27. Salov P.M., Salova D.P., Mulyukhin N.V., Plotnikov V.V. [Sanding of hard materials circles on a bunch of B156]. *Materialy II-oi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i liteinom proizvodstve"* [Proceedings of the II International scientific-practical conference "Modern technologies in mechanical engineering and foundry"]. Cheboksary, 2016, pp. 285–288. (In Russian).
28. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Petrov N.P., Rychkov D.A. [Improved processing of high strength composite materials]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences*, 2013, vol. 1, pp. 146–149. (In Russian).
29. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.
30. Borisov M.A., Mishin V.A., Dement'ev D.A. [Development of a programmable device for controlling current parameters during electrochemical processing]. *Materialy III-ei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Proektirovanie i perspektivnye tekhnologii v mashinostroenii, metallurgii i ikh kadrovoe obespechenie"* [Proceedings of the III All-Russian scientific-practical conference "Design and advanced technologies in mechanical engineering, metallurgy and their staffing"]. Cheboksary, 2017, pp. 188–192. (In Russian).
31. Borisov M.A., Mishin V.A. Aspekty primeneniya elektrokhimicheskogo shlifovaniya zuboproteznykh metallicheskih izdelii [Aspects of the use of electrochemical grinding of dental prosthetic metal products]. *Novye tekhnologii nauki, tekhniki, pedagogiki vysshei shkoly* [New technologies of science, technology, pedagogy of higher education]. Moscow, 2017, pp. 157–159.
32. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Formirovanie poverkhnostnogo sloya rezhushchego instrumenta pri almaznoi obrabotke krugami na metallicheskoj svyazke [Developing a surface layer of cutting tools in diamond grinding wheels on a metal bond]. *Reshetnevskie chteniya = Reshetnev Readings*, 2014, vol. 1, pp. 306–308.
33. Bratan S., Roshchupkin S., Revenko D. Probabilistic approach for modeling electroerosion removal of grinding wheel bond. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1426–1431. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.656.
34. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Research of influence electric conditions combined electro-diamond processing by on specific consumption of wheel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, p. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
35. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Zhigulev A.K., Skeebe P.Yu., Lobanov D.V. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "diamond smoothing". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 125, p. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.
36. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 81–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.

37. O'Brien R.L. *Welding handbook*. Vol. 2. *Welding processes*, pt. 1. 9th ed. American Welding Society Publ., 2004. 720 p. ISBN 0871717298. ISBN 978-0871717290.
38. Golyushov I.S., Smirnov V.M., Tsai V.N. [On the possibility of using capacitor welding for joining a steel shank with a diamond head on nanostructured copper bonds]. *Materialy IV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i liteinom proizvodstve"* [Proceedings of the IV International scientific and practical conference "Modern technologies in mechanical engineering and foundry"]. Cheboksary, 2018, pp. 475–481. (In Russian).
39. Golyushov I.S., Smirnov V.M. [On the application of the condenser welding in the technology of manufacturing of diamond heads on nano-structured copper bond]. *Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii dlya aspirantov, studentov i molodykh uchenykh* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference for graduate students, students and young scientists "Modern technologies: problems and prospects"]. Sevastopol', 2019, pp. 66–72. (In Russian).
40. Paul B.K., Wilson D.D., McDowell E., Benjarattananon J. Study of weld strength variability for capacitor discharge welding process automation. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2001, vol. 6, iss. 2, pp. 109–115. DOI: 10.1179/136217101101538613.
41. Palano F., Chiozzi S., Panella F.W., Dattoma V. Characterization of steel welded joints with hybrid projection and capacitor discharge welding (CDW) processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, vol. 27, iss. 12, pp. 1387–1391. DOI: 10.1080/10426914.2012.663140.
42. Magda A., Burcal M., Lego M. Research regarding capacitor discharge stud welding with tip ignition on galvanized thin sheets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 416, p. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/416/1/012015.
43. Oh H.S., Lee J.H., Yoo C.D. Simulation of capacitor discharge stud welding process and void formation. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, vol. 12, iss. 3, pp. 274–281. DOI: 10.1179/174329307X166803.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).