

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ТРУДНООБРА- БАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. И. Грабченко

Доктор технических наук, заведующий кафедры
Кафедра «Интегрированные технологии машиностроения»*

В. А. Коваль

Доктор технических наук, чл.-корр. ИА Украины
Институт проблем машиностроения
им. А.Н. Подгорного НАН Украины
E-mail: turbogaskoval1@rambler.ru

В. А. Федорович

Доктор технических наук, профессор*
E-mail: fedorovich@kpi.kharkov.ua

И. Н. Пыжов

Доктор технических наук, профессор*
E-mail: diamet@inbox.ru

В. Г. Клименко

Старший преподаватель
Полтавского национального технического
университета им. Ю. Кондратюка
E-mail: klim_poltava@mail.ru

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

Наведено результати досліджень спрямованих на дослідження можливості підвищення ефективності комбінованого процесу шліфування виробів з важкооброблюваних матеріалів за рахунок найбільш повного використання різального ресурсу алмазних зерен круга. Показано, що при обробці матеріалів, мікротвердість яких знаходиться в межах 20...100 ГПа, найкращі показники слід очікувати від комбінованих методів шліфування, заснованих на одночасному використанні різних видів додаткової енергії

Ключові слова: матеріал, шліфування, автономна зона, алмазний резець, правлячий катод, міжелектродний зазор

Приведены результаты исследований, направленных на изыскание возможности повышения эффективности комбинированного процесса шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов за счет наиболее полного использования режущего ресурса алмазных зерен круга. Показано, что при обработке материалов, микротвердость которых находится в пределах 20...100 ГПа, наилучшие показатели следует ожидать от комбинированных методов шлифования, основанных на одновременном использовании различных видов дополнительной энергии

Ключевые слова: материал, шлифование, автономная зона, алмазный резец, правящий катод, межэлектродный зазор

1. Введение, постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций

Известно [1, 2], что комбинированные процессы алмазного шлифования, основанные на введении в зоны резания или управления рабочей поверхностью круга (РПК) дополнительной энергии позволяют существенно расширить технологические возможности шлифования. В подавляющем большинстве случаев это, как правило, электрическая энергия. Ее использование позволяет активизировать процесс самозатачивания зерен круга, а, следовательно, существенно повысить производительность шлифования при относительно высоком коэффициенте использования режущего ресурса алмазных зерен. Однако по мере развития науки и техники появляются новые труднообрабатываемые материалы, микротвердость которых (20...100 ГПа) приближается, а в некоторых случаях равняется микротвердости алмаза. Они составляют особую группу так называемых сверхтвердых мате-

риалов, среди которых особое место занимают поликристаллические сверхтвердые материалы (ПСТМ) на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора микротвердость которых находится в пределах 60...100 ГПа.

Принципиальной особенностью обработки ПСТМ является тот факт, что съем припуска производится в основном за счет хрупкого микроразрушения обрабатываемого слоя, что возможно лишь в том случае, если зерна круга будут непрерывно самозатачиваться с образованием острых микро- и субмикроромок. К настоящему моменту этот процесс уже оптимизирован с одной стороны за счет правильного выбора характеристики алмазного круга (прочность зерен, концентрация, зернистость и связка круга), а с другой за счет выявления рациональных электрических параметров. Последние позволяют обеспечивать соответствие между скоростью износа алмазных зерен круга и интенсивностью удаления связки круга электроэрозионным или электрохимическим способом. По-

сколькx этот метод базируется на том принципе, что для наступления момента самозатачивания алмазных зерен необходимо обеспечивать их высоту выступания над связкой не менее определенного критического значения, то становится понятным, что и в этом случае режущий ресурс зерен используются не достаточно эффективно. Задача состоит в том, чтобы обеспечить возможность самозатачивания зерен путем их микро-разрушения при минимально возможных значениях их высоты выступания над уровнем связки, когда они практически все участвуют в работе.

Именно поэтому обработка ПСТМ вызывает особые трудности для технологов даже при наличии обычных комбинированных процессов алмазного шлифования, основанных на использовании электро-эрозионных и электрохимических эффектов.

2. Цель исследования

Целью данной работы является изыскание дополнительных возможностей повышения эффективности комбинированных процессов шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов.

3. Основные материалы исследования

Исследованиями, выполненными в последнее время, установлено, что при обработке ряда труднообрабатываемых (и особенно высокотвердых хрупких) материалов, зачастую бывает недостаточно использования только одного вида дополнительной энергии. Одним из путей повышения эффективности обработки может быть воздействие на алмазные зерна круга с помощью механических колебаний. Установлено [3], что если, например, в процессе шлифования сверхтвердых материалов приложить дополнительную нагрузку $P_{доп.}$, то самозатачивание зерен начнется при меньшем значении их высоты выступания, а, следовательно, при большем числе их в контакте. Контрольные эксперименты показали, что наиболее эффективно этот процесс реализуется в случае приложения дополнительной нагрузки с некоторым ударом: производительность обработки повышается в 1,5...2 раза при одновременном снижении во столько же раз удельного расхода алмазов круга и себестоимости обработки (при $K = 100\%$). В связи с этим был предложен способ шлифования ПСТМ с переменным давлением в контакте, осуществляемый путем целенаправленного периодического изменения усилия прижатия образца к кругу. Установлено, что достаточно хорошие результаты могут быть получены даже в случае, когда изменение усилия (а, следовательно, и давления в контакте) производится с инфразвуковой частотой.

Основным назначением ударного приложения дополнительной нагрузки является создание в зоне шлифования условий, способствующих активации процесса микроразрушения зерен и исключающих образование на них площадок износа или существенно уменьшающих период времени, в течение которого они существуют.

Для выяснения физической сущности процесса были проведены сравнительные испытания работо-

способности одного и того же круга с постоянным и переменным давлением в контакте (рис. 1).

Шлифование производилось при выключенной цепи электрофизикохимического воздействия на РПК (собственно алмазное шлифование). Как видно из рис. 1, через определенное время (в данном случае $\tau \approx 15$ мин) процесс самозатачивания зерен становится невозможным и сьем припуска с ПСТМ затухает. Увеличение дополнительной нагрузки позволяет снова активизировать режущую способность круга (кривая 3). Однако через некоторое время процесс шлифования вновь трансформируется в процесс трения пары «обрабатываемый ПСТМ - алмазные зерна» и сьем припуска прекращается.

При определенной величине нагрузки $P_{доп.}$ может наступить момент, когда все зерна, находящиеся на рабочей поверхности круга, войдут в контакт с ПСТМ. При этом неизбежен контакт поликристалла со связкой круга. В этих условиях [2] для обеспечения самозатачивания круга необходимы высокие силовые нагрузки, что недопустимо с позиции обеспечения требуемого качества обработки ПСТМ.

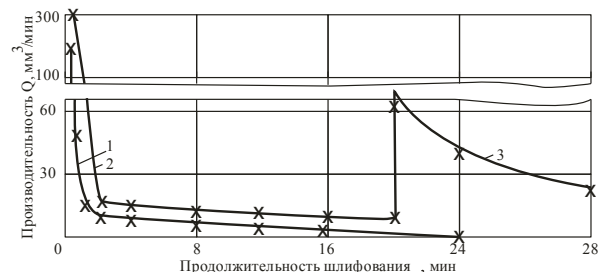


Рис. 1. Показатели процесса шлифования ПСТМ К10Д с постоянным и переменным давлением в контакте. Условия обработки: круг 12A2-45° 150x10x3x32 AC6 160/125 M1-01 100 %, $V_k=20$ м/с; $S_{пр}=1$ м/мин; $I=0$ А; $S_k=27$ мм². 1- $P_{н.пост.}=0,8$ МПа; 2- $P_{н.пост.}=0,8$ МПа; $P_{доп.}=10$ Н; 3- $P_{доп.}=50$ Н; $f=5$ Гц; $A=6$ мм

Следовательно, процесс активации режущего рельефа круга на металлической связке можно осуществить только в условиях непрерывного управления режущим рельефом круга (т.е. в условиях комбинированных процессов шлифования).

Основываясь на полученных положительных предварительных результатах, было сделано предположение, что в условиях непрерывного электрофизикохимического удаления связки круга влияние условий приложения дополнительной нагрузки на выходные показатели (в отличие от обычного шлифования) должно быть более активным.

Это нашло свое подтверждение как в условиях использования обычных (практически неуправляемых) вибраций, возникающих при вращении деталей системы «электродвигатель привода главного ижения – муфта – шпиндель – алмазный круг», так и управляемых ультразвуковых колебаний [3] в зоне шлифования.

В первом случае положительное влияние колебаний на процесс обработки нами подтверждено применительно к плоскому торцовому шлифрованию на станках с вертикальным расположением шпинделя. Здесь была предпринята попытка реализовать про-

стейшим образом идею вибрационного шлифования. Исследования показали наличие положительных результатов по производительности и расходу алмазов круга даже при использовании в процессе обработки вибраций, которые возникают при передаче вращения от электродвигателя главного привода на шпиндель не через ременную передачу, а, например, через муфту со сменным упругим элементом [4]. На рис. 2 приведена принципиальная схема плоскошлифовального станка с прямоугольным столом, совершающим возвратно-поступательное перемещение с продольной подачей $S_{пр}$ и периодической подачей $S_{в}$ на глубину шлифования.

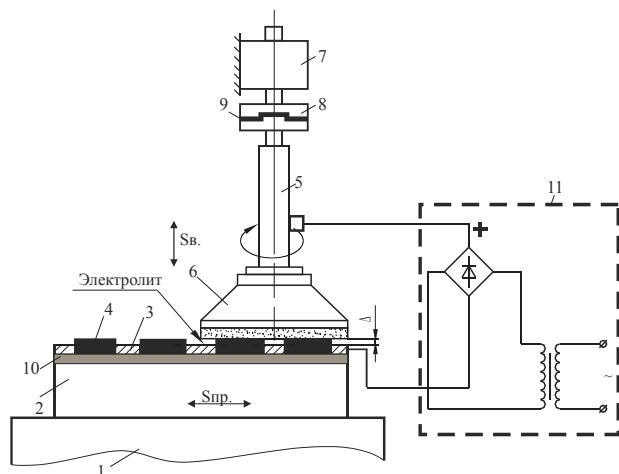


Рис. 2. Принципиальная схема управляемого процесса.

1 - стол станка; 2 - магнитная плита; 3 - сепаратор; 4 - обрабатываемый ПСТМ; 5 - шпиндель; 6 - алмазный круг; 7 - электродвигатель; 8 - полумуфта; 9 - сменный упругий элемент; 10 - изолятор; 11 - источник постоянного тока

Межэлектродный зазор (МЭЗ) Δ между кругом и сепаратором заполняется электропроводной жидкостью - электролитом (3% NaNO_3 , 0,5% NaNO_2 , остальное вода). Поскольку в данном случае нет возможности изменить силу тока за счет регулирования величины МЭЗ, то представляется целесообразным делать это путем изменения величины напряжения в цепи. Использование описанного выше процесса при обработке, например, минералокерамики ВОК 60 позволяет до 12% снизить эффективную мощность шлифования.

На основании выполненных предварительных исследований была выдвинута научная гипотеза о том, что дополнительно повысить эффективность управляемого процесса шлифования можно путем введения в зону шлифования управляемых колебаний, т.е. ультразвуковых колебаний возбуждаемых специальным генератором. Для ее подтверждения были проведены модельные эксперименты с использованием метода конечных элементов в пакете «Cosmos» [5]. Зона шлифования моделировалась в виде трехмерной модели «алмазное зерно-покрытие на зерне - металлическая фаза в зерне - связка круга - обрабатываемый материал». Модель нагружалась силовыми и температурными нагрузками в условиях воздействия на систему ультразвуковых колебаний.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния этой системы представлены на рис. 3.

Их анализ позволил установить, что наложение ультразвуковых колебаний в зону шлифования существенно интенсифицирует процесс обработки. Как видно из данных рис. 3, величина напряжений в зоне контакта «алмазное зерно - обрабатываемый материал» возрастает в 3 раза.

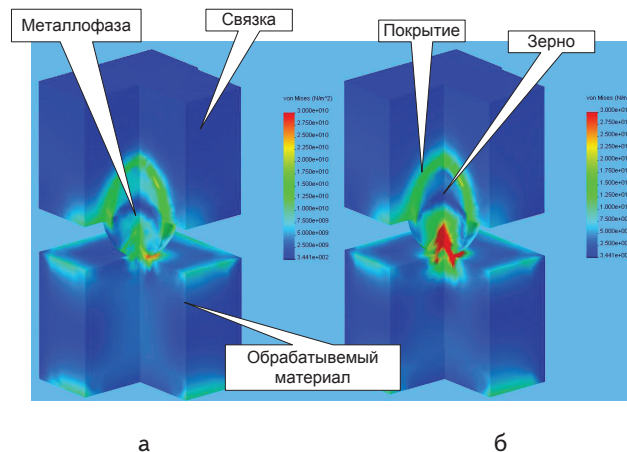


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние зоны шлифования без (а) и с наложением (б) ультразвуковых колебаний

В традиционных процессах ультразвукового шлифования положительный эффект заключается, в основном, либо в повышении качества обработанной поверхности при условии использования продольной амплитуды колебаний в системе «РПК - деталь», либо в повышении производительности обработки за счет увеличения глубины внедрения зерен (при поперечной амплитуде колебаний в системе «РПК - деталь»). В условиях обработки высокотвердых хрупких материалов, когда практически нет внедрения зерен в обрабатываемый материал, действие энергии ультразвуковых колебаний, вводимых в зону шлифования, проявляется более ярко, чем при шлифовании традиционных материалов.

Известно, что ультразвуковые колебания должны в первую очередь способствовать процессу самозатачивания (формирования режущего микро- и субмикрорельефа) алмазных зерен и таким образом минимизировать процесс образования площадок износа на них. В данном случае использование продольных колебаний в системе приведет, по нашему мнению, к обратному результату, поскольку будут способствовать интенсификации процесса образования на вершинах зерен площадок износа.

Это подтверждено экспериментальными исследованиями, которые показали, что при использовании продольных колебаний в системе «РПК - СТМ» площадки износа образуются в 1,5 ... 2 раза интенсивнее, чем при обычном алмазном шлифовании, а при поперечных колебаниях зерна могут оставаться с развитым рельефом практически до их износа до уровня связки.

Таким образом, в основном поперечные колебания, возбуждаемые в системе «РПК - СТМ», должны способствовать процессу самозатачивания алмазных зерен. Эта идея была реализована применительно к заточному станку (рис. 4). Здесь 1 - алмазный круг; 2 - токосъемник; 3 - генератор импульсов ШГИ-40-440;

4 – источник постоянного тока; 5 – катодное устройство; 6 – к генератору ультразвуковых колебаний; 7 – устройство ультразвуковой правки; 8 – шлифуемый образец; 9 – концентратор). Как видно из рисунка 4, энергия ультразвуковых колебаний в зону шлифования и/или в зону управления может подаваться от одного ультразвукового генератора типа УЗМ-1,5.

Подача энергии ультразвуковых колебаний в зону шлифования реализует выдвинутый в работе [6] принцип инверсии процесса приспособляемости за счет изменения динамики нагружения взаимодействующих поверхностей. Известен способ ультразвуковой правки кругов с применением генератора ультразвуковых колебаний, магнестрикционного вибратора, концентратора и ударника [7], который позволяет в 5 - 6 раз улучшить качество шлифуемой поверхности. Однако такой способ правки при шлифовании ПСТМ кругами на металлической связке сам по себе не решит проблему эффективной обработки ПСТМ, поскольку процесс шлифования закончится в пределах одной высоты выступания зерен над связкой. Даже способы шлифования с управлением параметрами режущего рельефа круга, разработанные в НТУ «ХПИ» [1,2], при всей их эффективности, не предусматривают непосредственного формирования субмикрорельефа алмазных зерен. В связи с этим нами предложены комбинированные способы шлифования более высокого уровня, которые основаны на воздействии на РПК одновременно несколько видов энергии, например, комбинация электрохимического и ультразвукового воздействия или электроэрозионного и ультразвукового воздействия.

Процесс ультразвукового шлифования может быть реализован путем подачи ультразвуковых колебаний на зерна круга как непосредственно через обрабатываемый ПСТМ, закрепленный на концентраторе (рис. 4), так и в автономной зоне.

Вибрационное воздействие на зерна осуществляется с помощью плоским инструментом-ударником 7 (рис. 3 а, б) с размерами 25×25×15, в рабочей поверхности которого закреплены «таблетки» из алмазосодержащего слоя на прочной металлической связке с мелкими и прочными алмазными зернами (АС160Т). Этот инструмент 7 крепится к концентратору колебаний 9 магнестрикционного вибратора 1. Работа вибратора приводится в действие от генератора ультразвуковых колебаний 6. Расчет формы и размеров концентратора 9 и способ крепления к нему плоского инструмента – ударника осуществлен по известной методике [10]. Частота и амплитуда колебаний определяются теоретически либо экспериментально в зависимости от требуемой интенсивности микроразрушения зерен.

Таким образом, предложенные способы предусматривают комплексное воздействие на РПК, причем как непосредственно в зоне шлифования, так и в автономной зоне и непрерывное принудительное формирование острых микро- и субмикроромок на алмазных зернах с регулируемой интенсивностью. При этом в основе всего лежит процесс электрофизикохимического удаления связки с интенсивностью, равной интенсивности износа зерен, что позволяет обеспечить непрерывное и последовательное введение в работу все новых алмазных зерен взамен износившихся.

Следует отметить, что для обработки ПСТМ с микротвердостью 20-60 ГПа, когда интенсивность линейного износа алмазных зерен относительно невелика, а, следовательно, и интенсивность удаления связки должна быть соответственной, может быть эффективно применен наиболее простой способ шлифования с вибрационно-эрозионным управлением РПК с использованием источника постоянного тока (рис. 4). Здесь электроэрозионный разряд (удаляющий связку) между металлической поверхностью инструмента-ударника и связкой осуществляется за счет изменяющегося зазора при вибрациях от h_{max} до h_{min} . Достоинством данного способа является простота реализации и отсутствие необходимости применения широкодиапазонных генераторов электрических импульсов типа (ГЭИ) ШГИ-40-440 [8], которые достаточно хорошо зарекомендовали себя при алмазно-искровом шлифовании электропроводных материалов, когда один из полюсов ГЭИ подключен к кругу, а второй к детали.

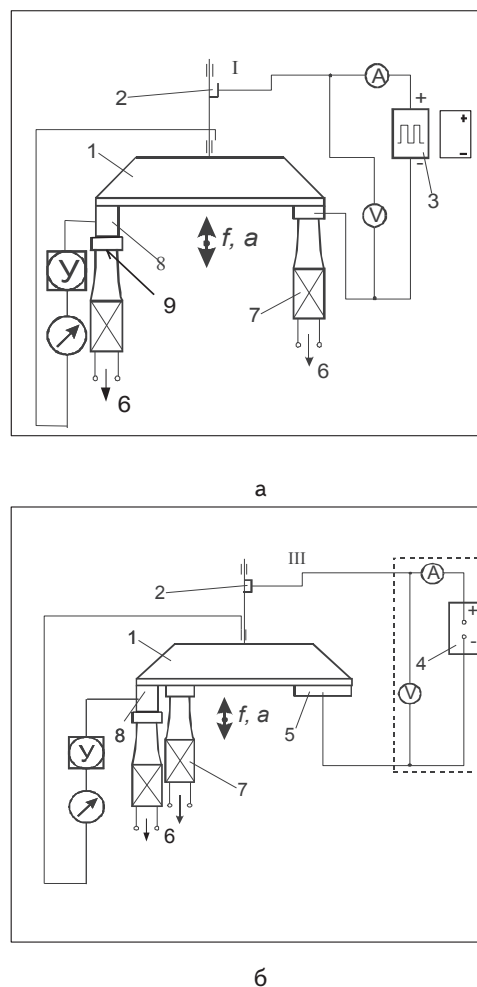


Рис. 4. Схемы способов алмазного шлифования с управлением режущим рельефом круга: а) – электроэрозионное удаление связки; б) – электрохимическое удаление связки

Наибольшей интенсивностью удаления связки с рабочей поверхности круга обладает способ ее электрохимического растворения в автономной зоне управления [1,2]. Поэтому, например, при обработке изделий из ПСТМ совместно со стальной державкой,

когда кроме удаления связки требуется еще и удалить продукты шлифования (металлическую стружку), наиболее эффективен будет способ шлифования с вибрационно-электрохимическим управлением режущим рельефом круга (рис. 4).

В данном случае на рабочей поверхности круга имеются три зоны (рис. 5): зона шлифования; зона принудительного формирования субмикрорельефа алмазных зерен; зона электрохимического управления профилем и развитостью режущего рельефа РПК.

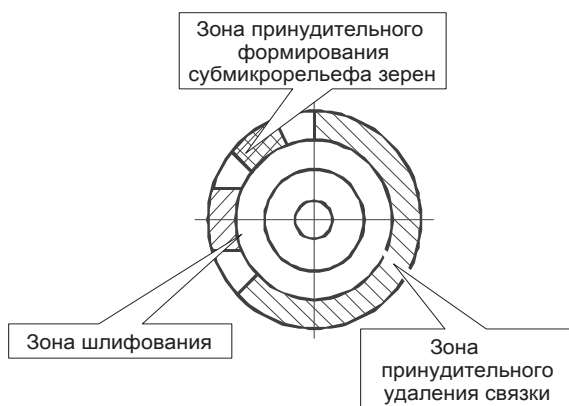


Рис. 5. Расположение зон на РПК

При обработке ПСТМ на основе алмаза микротвердость которых находится в пределах 60...100 ГПа, когда интенсивность износа алмазных зерен чрезвычайно высока, а, следовательно, требуется такое же интенсивное управляющее воздействие на связку круга, использование источника постоянного тока оказывается недостаточным. В этом случае для эрозионного управления параметрами РПК применяется генератор импульсов ШГИ-40-440 (рис. 4). Режимы работы этого генератора определяются экспериментально в зависимости от требуемой интенсивности управляемого воздействия на связку круга [8].

Общим для всех приведенных способов шлифования являются условия стабильности процесса шлифования, определяемые соотношением

$$V_{УС} = V_{ИЗН} + V_{УР} - V_{ЗГ}$$

где $V_{УС}$ – скорость удаления связки; $V_{ИЗН}$ – скорость линейного износа зерен в зоне шлифования; $V_{УР}$ – скорость линейного микроразрушения зерен в зоне ультразвукового шлифования и управления субмикрорельефом зерен; $V_{ЗГ}$ – скорость линейного заглабления (шаржирования) алмазных зерен в связку в зоне шлифования и управления.

При отключении управляющих воздействий на рабочую поверхность круга на алмазных зернах в массовом порядке образуются площадки износа и процесс трансформируется практически в процесс трения «алмаз – алмаз» с величиной съема на наноуровне. При использовании прецизионного (сверхточного) оборудования в этих условиях можно реализовать ультрапрецизионное шлифование сверхтвердых материалов [9,10].

Выполненные исследования позволили установить, что при одновременном использовании электрической и ультразвуковой энергий удается получить не суммарный, а эффект более высокого уровня практически по всем выходным показателям обработки. Это связано в первую очередь с тем, что появляется возможность максимального использования режущего ресурса алмазных зерен круга при работе с большими плотностями технологического тока.

4. Выводы и перспективы развития

Таким образом, выполненные исследования показали, что финишные процессы обработки, основанные на одновременном использовании различных видов дополнительной энергии, имеют серьезные перспективы применительно к изготовлению изделий из труднообрабатываемых материалов. В дальнейшем представляет значительный интерес более широкие исследования напряженно - деформированного состояния в зонах приложения ультразвуковых колебаний и выработка на их основе научно-обоснованных рекомендаций для практического применения предложенных способов шлифования.

Литература

1. Грабченко, А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования [Текст]/ Грабченко А.И. //Харьков: Вища школа, 1985. - 184 с.
2. Грабченко, А.И. Особенности контактного взаимодействия алмазных кругов с СТМ при шлифовании [Текст]/ А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов// Контактные процессы при больших пластических деформациях. - Харьков: Вища школа, 1982. - С. 33-37.
3. Грабченко, А.И. Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ. [Текст]/ А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, Д.М. Алексеенко. // Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки», №1, т.1, 2011.-С. 105-116.
4. Пыжов, И.Н. Повышение эффективности процесса алмазного шлифования ПНТМ за счет использования вибраций [Текст]/ И.Н. Пыжов // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків: 2004.- Вип. 1.-С. 113-116.
5. Грабченко, А.И. 3D моделирование процессов алмазно-абразивной обработки: монография [Текст]/ А.И. Грабченко, В.А. Федорович // .Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с.
6. Костецкий, Б.И. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки [Текст]/ Б.И. Костецкий, А.П. Шульман, В.А. Ляшко, И.Г.Носовский // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. – Киев, 1977. – Ч. 1. – С. 273–279.
7. Кумабэ, Д. Вибрационное резание; пер. с яп. С. Л. Масленникова [Текст]/ Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова//М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

8. Беззубенко, Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов / Н.К. Беззубенко. Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1996. – 468 с.
9. Сурду, Н.В. Пути повышения эффективности процессов резания труднообрабатываемых материалов [Текст]/Н.В. Сурду, А.А. Тарелин, В.В. Романов, А.Г. Фистик//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. –№2. – С.9 – 17.
10. Пат. 59078 Україна, МПК (2011.01) B24B 1/00. Спосіб комбінованої обробки матеріалів/А.І. Грабченко, І.М. Пижов, М.Д. Узунян, В.О. Федорович, Р.М. Стрельчук; заявник і патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». -№ у 2011 00017; заявл. 04.01.2011; опубл. 25.08.2011. Бюл. № 16. – 6 стр.

УДК 621.74.045:669.24:21.981

Досліджено комплексний вплив технологічних операцій термочасової обробки розплаву (ТЧО), модифікування ультрадисперсними частками карбонітриду титану $Ti(C,N)$ та наступного гарячого ізостатичного пресування (ГІП) на структуру і властивості жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, після стандартної термічної обробки

Ключові слова: термочасова обробка, модифікування, ультрадисперсні частки, гаряче ізостатичне пресування, термообробка

Изучено комплексное влияние технологических операций термовременной обработки расплава (ТВО), модифицирования ультрадисперсными частицами (УДП) карбонитрида титана $Ti(C,N)$ и последующего горячего изостатического прессования (ГИП) на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ, после стандартной термической обработки

Ключевые слова: термовременная обработка расплава, модифицирование, ультрадисперсные частицы, горячее изостатическое прессование, термообработка

КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖСЗДК-ВИ

П. Д. Жеманюк

Кандидат технических наук, технический директор *

В. В. Клочихин

Инженер, начальник лаборатории специальной металлургии *

E-mail: motor@motorsich.com

Н. А. Лысенко

Инженер*

В. В. Наумик

Доктор технических наук, профессор

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063

E-mail: naumik@zntu.edu.ua

*АО «Мотор-Сич»

просп. Машиностроителей, 15, г. Запорожье, 69068

1. Введение

Для получения качественных литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов для современного авиастроения необходимо постоянно совершенствовать технологические и металлургические процессы, обеспечивающие соответствующий уровень эксплуатационных свойств материалов и изделий.

Одним из перспективных направлений является обеспечение повышенной чистоты и однородности расплавов в процессе литейных технологических процессов.

Известно, что стали и сплавы с мелкокристаллической структурой обладают рядом преимуществ конструкционных и технологических свойств перед сталями и сплавами с крупнокристаллической структурой. Одним из перспективных направлений получения сплавов с мелкокристаллической структурой является модифицирование их тугоплавкими ультрадисперсными порошками (УДП). Применение нанотехнологии позволяет получать материалы с принципиально улучшенными свойствами, многократно повышать эффективность процессов [1 – 6].