Ассоциация технологов-машиностроителей Украины
Академия технологических наук Украины
Институт сверхтвердых материалов
им. В.Н. Бакуля НАН Украины
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
Союз инженеров-механиков НТУ Украины «КПИ»
ООО «НПП РЕММАШ» (Украина)
ООО «ТМ.ВЕЛТЕК» (Украина)
Украинский государственный университет железнодорожного транспорта
ОАО «Ильницкий завод МСО» (Украина)
Белорусский национальный технический университет
ГНПО «Центр» НАН Беларуси
Ассоциация инженеров-трибологов России
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
Издательство «Машиностроение» (Россия)
ООО «Композит» (Россия)
Каунасский технологический университет (Литва)
Машиностроительный факультет Белградского университета (Сербия)

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ

Материалы 17-й Международной научно-технической конференции

(29 мая–02 июня 2017 г., г. Одесса)

Киев – 2017

Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 17-й Международной научно-технической конференции, 29 мая–02 июня 2017 г., г. Одесса – Киев: АТМ Украины, 2017.– 264 с.

Научные направления конференции

- Научные основы инженерии поверхности:
  - материаловедение
  - физико-химическая механика материалов
  - физикохимия контактного взаимодействия
  - износо- и коррозионная стойкость, прочность поверхностного слоя
  - функциональные покрытия и поверхности
  - технологическое управление качеством деталей машин
  - вопросы трибологии в машиностроении
- Технология ремонта машин, восстановления и упрочнения деталей
- Метрологическое обеспечение ремонтного производства
- Экология ремонтно-восстановительных работ
- Сварка, наплавка и другие реновационные технологии на предприятиях горнометаллургической, машиностроительной промышленности и на транспорте

Материалы представлены в авторской редакции

© АТМ Украины,
2017 г.

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
Брянский государственный технический университет,
Брянск, Россия

ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

Качество и продолжительность эксплуатации наиболее ответственных деталей машин в значительной степени определяется состоянием и свойствами поверхностного слоя рабочих поверхностей, подвергаемых различным видам финишной обработки.

В последние годы в качестве окончательной обработки ответственных поверхностей деталей машин наиболее перспективными являются комбинированные упрочняюще-отделочные процессы, которые создаются на базе электрофизических методов обработки, позволяющих наиболее гибко управлять свойствами рабочих поверхностей тяжелонагруженных деталей.

В исследованиях рассматривалась комбинированная упрочняюще-отделочная обработка на основе лазерного или электромеханического упрочнения и последующей отделочной обработки с применением инструментов из синтетических сверхтвердых материалов.

Поскольку лазерная и электромеханическая обработка вызывают существенное повышение поверхностной микротвердости поверхностных слоев (до 8000–9000 МПа), а также учитывая то, что поверхностные слои имеют ограниченную глубину упрочнения, в качестве отделочных операций целесообразно принять методы поверхностного пластического деформирования (алмазное выглаживание), а также методы алмазно-абразивной обработки (алмазное виброполирование).

В результаты комбинированной механической обработки, основанной на использовании лазерного и электромеханического упрочнения и последующих алмазного выглаживания или алмазного виброполирования, удается осуществить, с одной стороны, управление физико-механическими свойствами поверхностных слоев (в частности поверхностной микротвердостью, глубиной и другими показателями упрочнения) за счет изменения режимов упрочнения и учета закономерностей влияния технологической наследственности и, с другой стороны, управление геометрическими параметрами поверхностных слоев (в частности параметрами шероховатости, ха-

рактеризующими распределение ее ординат по высоте, а также форму неровностей) за счет выбора методов и изменения условий осуществления отделочной обработки [1].

На основе комбинированной упрочняюще-отделочной обработки, осуществляемой лазерным упрочнением и последующим алмазным виброполированием, предложен метод, защищенный авторским свидетельством (а.с. 1148350, МКИ^4 С 21 D 1/09), обеспечивающий создание нового класса поверхностей с регулярным рельефом (с отношением шага неровностей к высоте от 1000 до 2000) и имеющих микротвердость поверхностных слоев на упрочненных участках до 10 000 МПа и позволяющий снизить величину начального износа трущихся поверхностей на 30% и в 2–3 раза сократить период их приработки.

Исходя из различной интенсивности съема материала с упрочненных и неупрочненных лазерной обработкой-участком при алмазном полировании получены уравнения, позволяющие теоретически определить важнейшие в функциональном отношении параметры регулярного рельефа (высота и радиус выступов, наибольшую высоту неровностей рельефа) в зависимости от плотности энергии лазерного излучения, времени полирования и соотношения площадей поверхностей, упрочненных и не упрочненных лазерной обработкой.

Так, интенсивность изнашивания пар трения «упрочненная цементацией и электромеханической обработкой цилиндрической поверхности детали из стали 40ХН2МА – контртело из бронзы Бр05Ц5С5» в условиях граничного трения при изменении метода отделочной обработки упрочненных поверхностей (со шлифования на алмазное выглаживание) уменьшается с 1,69 до 0,84 мг/с, т.е. в 2 раза, в то время как, для пар трения, у которых образец подвергался ЭМО, она уменьшается по сравнению с парами трения, у которых образец подвергался цементации с 1,61 до 0,91 мг/с, т.е. лишь в 1,77 раза [2].

Комбинированная обработка на основе электромеханического упрочнения и последующего алмазного выглаживания. С помощью такой обработки удается снизить интенсивность изнашивания упрочненных поверхностей (по сравнению с цементацией и последующим шлифованием) с $1{,}09 \cdot 10^{-10}$ до $2{,}2\text{-}10^{-11}$, т.е. в 4,95 раза и контртел из бронзы с 0,47 до 0,17 мг/км, т.е. в 2,76 раза.

Исследовался способ комбинированной упрочняюще-отделочной обработки на основе импульсного электромеханического уточнения, позволяющий получить новый класс поверхностей с регулярной микротвердостью, величины которой соизмеримы со значе-

ниями, характерными для лазерной обработки. Применение такой обработки для упрочнения рабочих поверхностей стальных деталей по данным стендовых испытаний позволяет в сравнении с закалкой ТВЧ снизить интенсивность изнашивания антифрикционных втулок из сплава ЦАМ 10–5 в 1,63 раза.

Литература

1. Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. Технологическое обеспечение продолжительности эксплуатации тяжелонагруженных деталей и элементов производственной оснастки // Металлообработка – 2015: Тез. международ. науч.-практ. конф., 2015 г., г. Минск. – Мн., 2015. – С. 11–13.

2. Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. Комбинированная обработка тяжелонагруженных деталей машин // Технология оборудование-инструмент-качество: Мат. международ. науч.-практ. конф., 2016 г., г. Минск. – Мн.: БНТУ, 2016. – С. 9–11.

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
Брянский государственный технический университет,
Брянск, Россия

ПРОИЗВОДСТВО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ НАНОАЛМАЗОВ ПОЛУЧАЕМЫХ ДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

На современном этапе промышленного развития основной тенденцией технического прогресса является технологическая модернизация производства. Наряду с этим постоянно растут требования к повышению производительности обработки, а также к качеству обрабатываемых рабочих поверхностей.

Такое состояние производства определяет постоянный рост применения различных синтетических сверхтвердых материалов, которые по своей твердости и прочности в 3–5 раз превышают обрабатываемый материал. Теоретические и экспериментальные исследования при производстве синтетических алмазов ведутся в направлении изыскания возможностей как наиболее эффективного использования их в

традиционных областях, так и для расширения областей применения, а также в направлении разработки новых методов изготовления поликристаллических алмазов с заданными свойствами, обеспечивающими условия их дальнейшей эксплуатации.

Исходными материалами для производства (спекания) поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) могут служить как шлифпорошки алмазов синтетических (АС) зернистостей 5/3–14/10 мкм, так и синтетические ультрадисперсные алмазы (УДА) – наноалмазы, получаемые детонационным синтезом под воздействием энергии взрыва тротил-гексогена, размер наноалмазных частиц которых составляет 3–20 нм в зависимости от условий протекания процесса синтеза.

Наиболее распространенный способ спекания поликристаллических алмазов – предварительное холодное брикетирование шихты из наноалмазов, а затем – спекание в пресс-формах аппаратов высокого давления (АВД) с пропусканием импульса электрического тока. В настоящее время электроимпульсное спекание является наиболее перспективным методом активированного спекания ПСТМ. Суть метода состоит в сжатии брикетов шихты статическим давлением с последующим разогревом и спеканием путем пропускания через нее импульсного электрического тока. Спекание поликристаллических алмазов обычно осуществляется на специальных прессовых установках с усилием 5–10 МН. При этом в рабочей зоне камеры АВД создается давление 10–15 ГПа в диапазоне температур 3000–4000 К, в зависимости от характеристик спекаемых поликристаллических алмазов.

Алмазные инструменты, изготавливаемые в дальнейшем из ПСТМ можно условно разделить на два класса [1]:

- многокристальные инструменты, к которым относятся буровые коронки, правящие инструменты и отдельные виды режущих инструментов;
- однокристальные инструменты, к которым относятся режущие и контрольно-измерительные инструменты, алмазные волоки и правящие инструменты некоторых видов.

Многокристальные инструменты чаще всего изготавливают из необработанных кристаллов технических алмазов или дробленных ПСТМ сравнительно небольшой массы – до 0,02 карат. Однокристальные инструменты обычно изготавливают из ПСТМ более крупных размеров (0,02–7,0 карат), используя при этом целиковые спеки или применяют резку спеков на сегменты.

В настоящее время разработана широкая номенклатура инструментов из ПСТМ, имеющих различные физико-механические свойства, выбираемые в зависимости от обрабатываемого материала и условий эксплуатации алмазного инструмента. Так на основании вышеизложенного были созданы варианты технологических процессов изготовления широкой гаммы конструкций алмазных инструментов различного назначения из ПСТМ [2]. Представленные выше материалы показывают, что создание новых конструкций алмазного инструмента из ПСТМ позволяет не только значительно расширить область эффективного применения предлагаемого инструмента в различных отраслях метало- и камнеобрабатывающей промышленности, но и в определенной степени исключить возможность использования инструментов из природных алмазов.

В заключении следует отметить, что как показали предварительные исследования и расчеты технико-экономической эффективности себестоимость инструментов ПСТМ изготавливаемых из наноалмазов, получаемых детонационным способом в среднем в 8 – 10 раз ниже себестоимости инструментов изготавливаемых из природных алмазов [3,4].

Литература

1. Надуваев В.В., Фролов Е.Н. перспективы использования инструментальных материалов Св-алмазов в промышленности // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 10. – С. 49–54.

2. Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. Технология производства поликристаллических алмазов используемых в различных отраслях промышленности // Металлообработка – 2015: Тез. международ. науч.-практ. конф., 2015 г., г. Минск. – Мн., 2015. – С. 11–13.

3. Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. Технология производства поликристаллических алмазов на основе синтетических наноматериалов получаемых детонационным способом // Технология оборудование-инструмент-качество: Мат. международ. науч.-практ. конф., 2016 г., г. Минск. – Мн.: БНТУ, 2016. – С. 7–9.

4. Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н Формирование поверхностей с использованием инструментальных материалов СВ-алмазо0 // Известия ТГУ «Технические науки» - 2016. – ч.1. – С 306–315.

Адамовский А.А., Варченко В.Т., Найдич Ю.В.
Институт проблем материаловедения
им. И.Н.Францевича НАН Украины, Киев, Украина

ТРЕНИЕ И ИЗНОС СВЕРХТВЕРДЫХ И ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Надежность машин и механизмов определяется совершенством узлов трения. Доминирующее влияние на работу узла трения оказывает материал трущихся тел, внешние факторы, конструкция узла трения. Более изучены процессы трения металлов. Известно, что в процессе трения меняется структура поверхности металлов, возникают вторичные фазы. Однако, металлы не выдерживают больших нагрузок и не пригодны для работы в экстремальных условиях – при сухом и полусухом трении, больших нагрузках, скоростях. В этих условиях наиболее перспективными являются сверхтвердые и высокомодульные материалы. Известны сверхтвердые материалы – алмаз (твердость 100 ГПа), кубический нитрид бора (cBN, твердость 90,5 ГПа); высокомодульные материалы – карбид (WC, E = 710 ГПа) и борид (W_2B_5, E = 790 ГПа) вольфрама. Установлено [1], что коэффициент сухого трения алмаза по алмазу равен f = 0,05–0,25 и зависит от кристаллографической плоскости скольжения; алмаз выдерживает без разрушения давления до 0,1 модуля Юнга. Теоретические расчеты показали [2], что коэффициент сухого трения при контакте cBN по cBN равен f = 0,21. Исследования показали [3], что эффективными материалами при высокоскоростном (до 40 м/с) трении являются композиты с высокомодульными наполнителями.

Методом вакуумной пайки изготовлены образцы пар трения из сверхтвердых материалов на основе cBN (эльбор-Р, гексанит-Р, композит 05-ИТ) и высокомодульных материалов – твердых сплавов группы ВК и ТК (ВК6, ВК15, Т15К6), спеченных по стандартному режиму. Материалы испытаны в условиях сухого трения на воздухе в сравнении с нитридной керамикой (Si_3N_4). Использовали схемы испытания: образец (сверхтвердые материалы на основе cBN, Si_3N_4) – ролик (твердые сплавы). Режимы испытания: скорость скольжения V = 1–6 м/с; нагрузка P = 50–100 Н; давление в зоне трения 14,7–108,8 МПа. Исследовали коэффициенты трения, износ пар трения, температуры узла трения в зависимости от скорости скольжения и сочетания материалов пар трения.

Установлено, что с повышением скорости скольжения (1–6 м/с) коэффициент трения материалов на основе cBN по твердым сплавам уменьшается с f = 0,62 до 0,37, а температура в зоне трения возрастает до 300 ^{o}C. Существенного различия коэффициентов трения от марки cBN и твердых сплавов не наблюдали. Суммарный линейный износ пар трения составил, мкм/км: 2,5–9,0 (эльбор-Р – твердые сплавы); 5,8–14,0 (композит 05-ИТ – твердые сплавы); 2–6 (гексанит-Р – твердые сплавы). По уменьшению износа сверхтвердые материалы на основе cBN располагаются в следующей последовательности: композит 05-ИТ–эльбор-Р–гексанит-Р. Твердые сплавы в контакте со сверхтвердыми материалами изнашиваются в 3–6 раз больше сверхтвердых материалов.

Износ при сухом трении Si_3N_4 по твердым сплавам равен 2,0–15,1 мг/км, износ материалов на основе cBN составил 0,32–0,84 мг/км при нагрузке 100 Н и скорости скольжения 3 м/с. Следовательно, износ cBN меньше Si_3N_4 на два порядка. Такая разительная разница в износе по твердым сплавам обусловлена тем, что керамика Si_3N_4 обладает меньшей твердостью (13,5–16 ГПа) и модулем упругости (E = 280–320 ГПа) по сравнению с материалами на основе cBN (твердость 18,5–38,6 ГПа; E = 715–840 ГПа).

Литература

1. Боуден Ф.П., Тейбор Д.. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение. – 1968. – 543 с.

2. Roskilinna J.O., Linnolahti M., Pakkanen T.A. Friction Paths for Cubic Boron Nitride: An Ab Initio Study // Tribology Letters. – 2007. – V.27. – №2. – P. 145–154.

3. Бондаренко В.П., Андреев И.В., Бондарь В.И. Перспективы повышения поверхностной прочности и противозадирной стойкости триботехнических материалов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент–техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.– К.: ИСМ им. В.Н.Бакуля НАНУ, 2007. – Вып. 10. – С.455–459.

Акулович Л.М., Миранович А.В., Мисько В.Г.
Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

В ремонтном производстве наиболее востребованы технологии нанесения износостойких покрытий, обеспечивающие восстановление изношенных поверхностей с одновременным упрочнением поверхностных слоев [1]. К их числу относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ), сущность которого состоит в распределении частиц ферромагнитного порошка (ФМП) на поверхности детали с использованием магнитного поля и их расплавлением под действием энергии электрических разрядов [2]. Микроструктура упрочненного слоя, обеспечивающая его физико-механические параметры, определяется химическим составом упрочняющего порошка и материала основы.

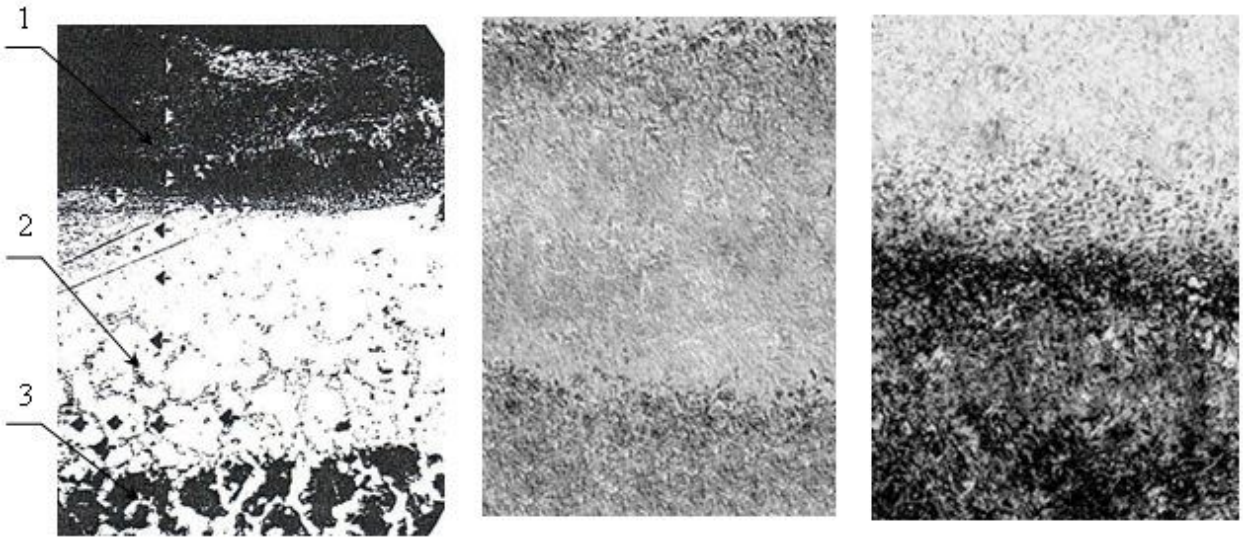
Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из стали 45 (ГОСТ 1050-88), микроструктура которых после закалки (твердость 240 НВ) представляла собой смесь феррита и сорбитообразного перлита. На поверхность образцов наносили покрытия из двухкомпонентных легированных порошков на основе железа: ферробора ФБ-17 (ГОСТ 14848-69), Fe-2%V и Fe-Ti (ГОСТ 9849-86), а также сплава ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75).

Микроструктура покрытий изучалась методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» (Австрия) и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera». Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки на индентор $P \sim 0{,}49$ Н (50 г). Толщину покрытий определяли по распределению микротвердости в поперечном сечении образцов при помощи окулярной вставки с увеличением в 200 раз.

Общим в структурном строении упрочненного слоя исследованных покрытий является то, что в нем можно выделить три зоны: наплавленную, диффузионную и зону термического влияния (рис. 1). Микроструктура упрочненного слоя, определяющая его физико-

механические параметры, зависит от химического состава упрочняющего порошка и материала основы.

При упрочнении ферробором ФБ-17 основными структурными составляющими являются закалочный мартенсит, сорбит и комплексные бориды на основе FeB и Fe_2B. Наплавленный слой содержит большое количество мелкодисперсных боридов с микротвердостью 16–18 ГПа (рис. 1, *а*). Диффузионная зона представляет собой α-твердый раствор бора в железе с микротвердостью 8–11 ГПа. На границе наплавленного и диффузионного слоев заметен тонкий боридный слой, а на границе диффузионного слоя и матрицы обнаружено повышенное содержание углерода на глубине около 100 мкм.



а *б* *в*

Рисунок 1 – Фотографии микроструктуры покрытий из ФМП после МЭУ:
1 – наплавленная зона; 2 – диффузионная зона; 3 – зона термического влияния; *а* – ФБ-17 (×200), *б* – ФБХ-6-2 (×500), *в* – Fe-Ti (×500)

В покрытии из ФБХ-6-2 наплавленный слой имеет микроструктуру мелкодисперсного строения (рис. 1, *б*). Поверхностные слои толщиной 100–150 мкм состоят из частиц очень тонкого игольчатого строения размером до 5 мкм, которые вытянуты в сторону основного металла и увеличиваются до 10-15 мкм. Основу покрытия составляет твердый раствор хрома в *α*-железе, остаточный аустенит, а также карбиды железа (Fe_2C), бориды (FeB, CrB_2, Cr_5B_3) и ферроборида ($Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$).

Структура покрытия из ФМП Fe-Ti характеризуется мелкодендритным строением (рис. 1, *в*), основу которого составляет твердый раствор титана в α-железе, а также незначительного количества остаточного аустенита, интерметаллидов (FeTi, Fe_2Ti), карбидов тита-

на (TiC) и железа (FeC). Граница раздела имеет плавный переход, в котором на глубине до 50–90 мкм происходит полная фазовая перекристаллизация материала основы с последовательным образованием структур – однофазной (дислокационный мартенсит) и двухфазной (дислокационный мартенсит и рекристаллизованный феррит).

Покрытие из порошка Fe-2%V также характеризуется мелкодендритным строением, основу которого составляет твердый раствор ванадия в α-железе, остаточный аустенит, карбиды ванадия (V_2C, $V_4C_{2,67}$) и железа (FeC, FeC_8). Диффузионная зона имеет структуру дислокационного мартенсита. Зона термического влияния представляет собой область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троосто-мартенсит. Результаты экспериментальных исследований поверхностного слоя показывают, что микротвердость изменяется по трем четко выраженным участкам – наплавленная зона, диффузионная зона и зона термического влияния. Максимальная микротвердость наблюдается у покрытий из ФМП ФБ-17 (наплавленная зона – до 18 ГПа, диффузионная зона – 8,0–11,4 ГПа) и ФБХ-6-2 (наплавленная зона – 7,3–8,7 ГПа), что обусловлено формированием в результате скоростного охлаждения мелкодисперсной структуры слоев, в которых присутствуют закалочный мартенсит и комплексные бориды хрома CrB_2, Cr_5B_3, ферроборид $Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$, а также бориды на основе железа FeB и FeB_2.

Характерной особенностью покрытий является высокая однородность наплавленных слоев и, как следствие, незначительные изменения микротвердости по толщине покрытий из порошков Fe-Ti и Fe-2%V (в пределах 4,5–6,2 ГПа).

Толщина наплавленных слоев покрытий, полученных при МЭУ с использованием исследуемых ФМП, находится в пределах 200–300 мкм, а протяженность зоны термического влияния колеблется в пределах 80–110 мкм (рис. 2).

По характеру распределения микротвердости можно судить об изменениях фазового состава и толщины упрочненной зоны.

Структура и микротвердость металла поверхностного слоя являются основным показателем, определяющим износостойкость в условиях абразивного изнашивания. При этом износостойкость борированных слоев на 40-50 % выше, чем цементованных. Поэтому для таких условий предпочтительно использовать покрытия из ФМП ФБ-17 и ФБХ-6-2.

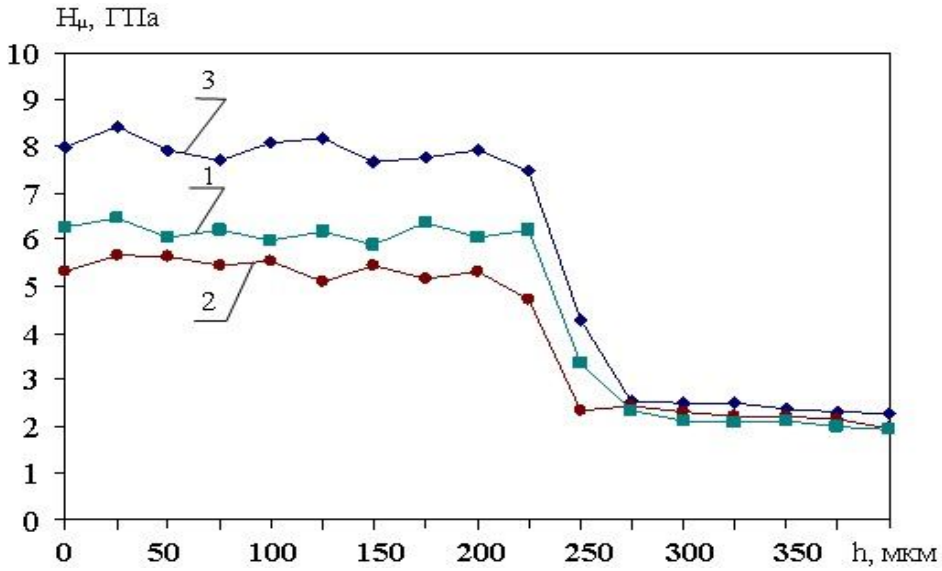


Рисунок 2 – Распределение микротвердости *Hμ* по толщине наплавленного слоя *h*, полученного при МЭУ.

Покрытия из ФМП: 1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Результаты проведенных исследований структуры и микротвердости покрытий могут быть использованы при разработке технологий восстановления и упрочнения деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники.

Литература

1. Технология ремонта машин / Под ред. Е.А. Пучина. – М : УМЦ «Триада», 2006. – ч. I. – 348 с.

2. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Мн.: БГАТУ, 2016. – 236 с.

Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Сенчуров Е.В., Дубновицкий С.К. Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЗАКАТОЧНЫХ РОЛИКОВ

Общая масса металла, используемого в разнообразных объектах техники и конструкциях, непрерывно возрастает из года в год. Потери металла от коррозии также адекватно увеличиваются, достигая таких масштабов, что становятся сравнимыми с затратами на разви-

тие крупнейших отраслей промышленности [1]. До 2/3 металла, заключенного в выходящих из строя металлоконструкциях, возвращается в металлооборот как вторсырье, а 10–15% общего объема ежегодно добываемого металла, теряется и составляет невозвратимые потери. Считается, что «каждая 6-я домна металлургической промышленности работает на восполнение коррозионных потерь» [2]. Вопросы защиты металлических материалов от коррозии становятся все более актуальными. Полностью предотвратить коррозию металлов невозможно, поэтому единственным путем борьбы с ней является поиск способов ее замедления [3].

Коррозионная стойкость рабочих поверхностей деталей во многом определяется состоянием поверхностного слоя. Основные свойства поверхности формируются в процессе ее изготовления и, особенно, на отделочных операциях. Одним из перспективных способов обеспечения высокого качества рабочей поверхности является технология магнитно-абразивной обработки (МАО).

Для возможности реализации МАО были проведены экспериментальные исследования по определению технологических режимов обработки поверхности закаточного ролика.

Материал ролика Х12М ГОСТ 5950-73, НВ 90-120. В качестве оборудования для МАО использовался станок СФТ 2.150.00.00.000. ферроабразивный порошок (ФАП) – Ж15КТ, зернистость ФАП, $\Delta = 100/160$ мкм, СОТС – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5% водный раствор. Величина рабочего зазора варьировалась от $\delta = 1–3{,}5$ мм, коэффициент заполнения рабочего зазора, $k_з = 1$, время обработки составляло $t = 120$ с. Исходная шероховатость поверхности ролика Ra_1 0,8–1. Выходными показателями служит величина удельного массового съема материала, Q (мг) и достигаемая шероховатость поверхности, Ra_2, мкм. Изменение массового съема производили на весах аналитических ВЛА 200г с точностью до 10^{-6} кг, шероховатость – на профилографе-профилометре 252-Калибр.

В ходе исследований установлены особенности влияния защитных слоев, полученных термической обработкой, шлифованием и магнитно-абразивной обработкой, на коррозионные свойства исследуемого закаточного ролика. Для этого проводились коррозионные испытания в 10% водном растворе NaCl при температуре 20 ºС. Методика определения коррозионной стойкости заключалась в оценке площади поверхности, занятой продуктами коррозии. Испытаниям были подвергнуты образцы после токарной обработки, термической

обработки, шлифования и МАО. На основании полученных данных измерений площади, занятой продуктами коррозии, были построены зависимости интенсивности развития коррозии исследуемого образца от времени нахождения в соляном растворе (рис. 1).

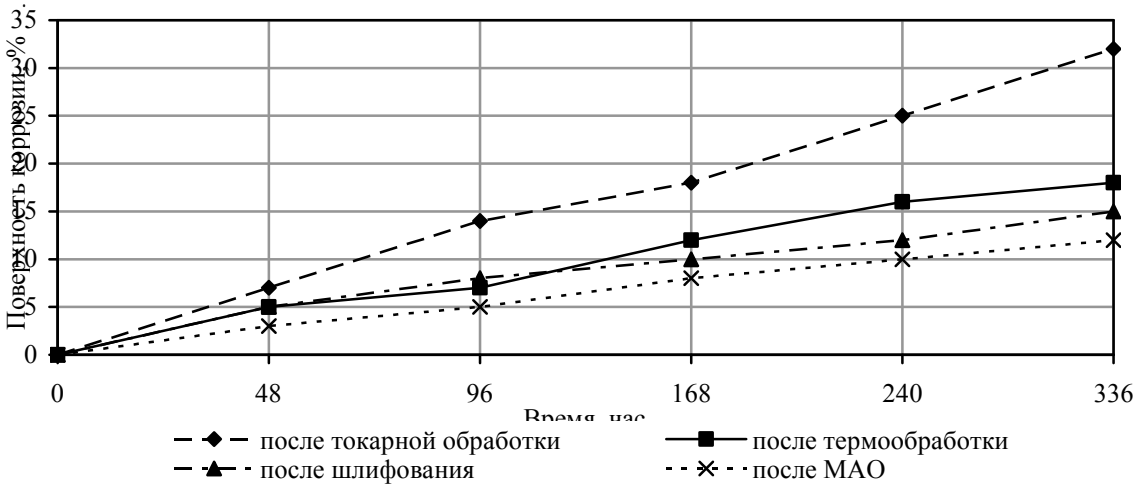


Рисунок 1 – График коррозии образцов в зависимости от времени проведения эксперимента

Уменьшение шероховатости поверхности существенно улучшает антикоррозионную стойкость деталей и позволяет повысить срок эксплуатации. Это особенно важно в данном случае, так как для поверхности закаточного ролика не могут быть использованы защитные покрытия для обеспечения наилучшей коррозионной стойкости.

Образец после магнитно-абразивной обработки, выдержавший 336 часов испытаний в 10% растворе NaCl, имеет площадь, занятую продуктами коррозии 12% (коррозия была выявлена лишь на рабочем участке закаточного ролика), в отличие от остальных образцов – после токарной обработки, после термообработки и после шлифования, процент покрытия продуктами коррозии которых составил 32, 18, 15 %, соответственно.

Анализ приведенных результатов эксперимента показывает, что выбор технологической схемы обработки, включающей МАО, позволяет управлять коррозионной стойкостью поверхности детали.

Литература

1. Защита металлов. – 2000. – № 3. – С. 315.

2. Наука в России. – 2003. – № 6. – С. 112.

3. Михайловский, Ю. Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. – М.: Металлургия, 1989. – 102 с.

Блюменштейн В.Ю. Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
Кемерово, Россия

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРУЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В условиях современного машиностроения постоянное внимание уделяется совершенствованию схем и методов механической обработки. Ключевое внимание уделяется повышению точности обработки и качества поверхностного слоя деталей машин. Разработка новых инструментов и технологий основана, в первую очередь, на моделировании процессов механической обработки. Современные конечно-элементные программные продукты позволяют разрабатывать модели высокого качества, о чем свидетельствует их сравнение с экспериментальными тестами. Анализ показал, что повышение эффективности (интенсификация) процессов «холодной» механической упрочняющей обработки, возможно, в том числе, путем создания в очаге деформации сложного напряженно-деформированного состояния с преобладающим схемами с высоким гидростатическим давлением. В свою очередь, такие схемы реализуются инструментами, имеющими сложную геометрию и обеспечивающими определенную кинематику течения металла.

Результаты усталостных испытаний упрочненных ППД образцов показали, что исчерпание запаса пластичности до определенного предела полезно с точки зрения увеличения циклической долговечности. В то же время это приводит к обратному эффекту на стадии циклической трещиностойкости, увеличивая скорость роста трещин и сокращая продолжительность этой стадии. Установлено, для каждого материала и каждой программы нагружения существует определенный уровень степени исчерпания запаса пластичности, начиная с которого происходит повышение интенсивности скорости роста трещин.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать новые конструкции деформирующих инструментов, имеющих сложный рабочий профиль. Так, в частности, ролик обкатной мультирадиусный (МР-ролик) имеет форму профиля рабочей поверхности в виде комбинации последовательно расположенных деформирующих элементов (ДЭ) с радиусами постоянной величины,

расположенными относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном и осевом направлениях (рис. 1).

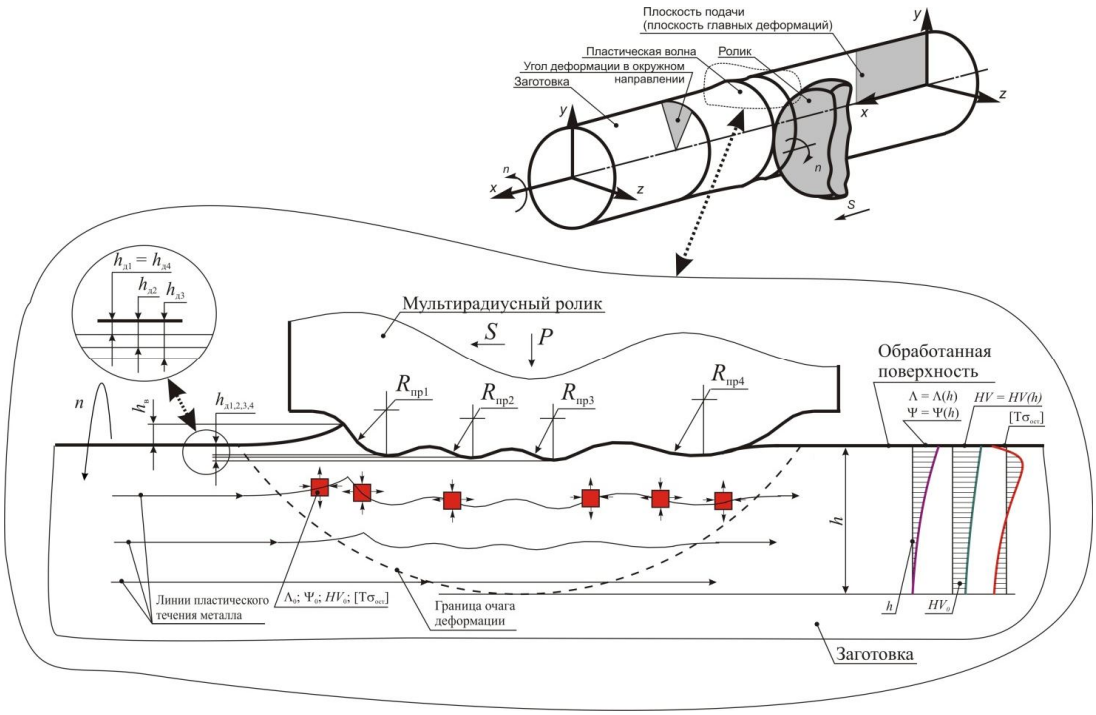


Рисунок 1 – Схема обработки ППД мультирадиусным роликом

Оценка механического состояния очага деформации при обработке МР-роликом проводилась путем МКЭ-моделирования. Выявлена картина пластического течения металла в очаге деформации в условиях сложного напряженного состояния и показано, что данная конструкция профиля приводит к перекрытию зон пластического течения, расположенных между соседними деформирующими элементами.

Показано, что такая конструкция мультирадиусного ролика приводит к сложному напряженному состоянию металла, при котором происходит неоднократная смена знака пластической деформации. Анализ результатов МКЭ-моделирования показал, что профиль очага деформации с достоверностью свыше 85% совпадает с экспериментальным профилем, полученным методом профилографирования после быстрого отвода/отстрела МР-ролика от поверхности детали. Это говорит о корректности постановки МКЭ-модели и решения задачи по определению компонент тензоров напряжений и деформаций.

Второй важный вывод заключается в том, что в верхних слоях очага деформации металл находится в условиях сжатия. Все компоненты тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций изменяются в соответствии с профилем деформирующих элементов МР-ролика.

Третий важный вывод заключается в том, что ввиду сложной картины течения металла в тех же характерных зонах в соответствии с теми же тенденциями скорости деформации неоднократно меняют величины и знак. Тем самым накопление степени деформации сдвига и исчерпание запаса пластичности металла происходят непрерывно при отрицательном значении показателя схемы напряженного состояния. При этом даже при существенной накопленной деформациит $\Lambda \approx 7$ вследствие благоприятной схемы деформирования степень исчерпания запаса пластичности не превышает значений $\Psi \leq 0{,}62$.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемая конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет накапливать большие значения деформаций без разрушения металла поверхностного слоя, что предоставляет дополнительные возможности по обеспечению, как циклической долговечности, так и циклической трещиностойкости.

Исследования микротвердости металла зоны очага деформации и упрочненного поверхностного слоя, проведенные на приборе мод. DuraSkan 20, подтвердили полученные закономерности.

Бородавко В.И., Вабищевич П.А., Грецкий Н.Л.,
Пынькин А.М., Пуляев В.К. ГНПО «Центр» НАН Беларуси,
Волотовский Ф.А., Корзун А.Е. ОАО
«ОКБ Академическое» НАН Беларуси,
Хейфец М.Л. Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПАКЕТА ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Паровые турбины во время работы подвергаются воздействию различных факторов, высоких температур, коррозии, эрозии, а в результате материал испытывает статические, динамические и температурные напряжения. Рабочие лопатки являются одними из наиболее ответственных и дорогих элементов турбины. От качества материала, выполнения и установки лопаточного аппарата в значительной степени зависит надежность и экономичность эксплуатации

турбины. Тяжелые условия работы лопаточного аппарата определяют те высокие требования, которым они должны соответствовать.

Лопатки первой ступени изготавливаются за одно целое с участком бандажа и хвостовой части и поступают на сборку в виде пакета из двух лопаток, сваренных между собой по бандажу и хвосту. При наборе лопаток на диск между бандажами каждой пары лопаток выдерживается зазор от 0,3 до 0,8 мм, замыкается каждый ряд лопаток замковыми пакетами (рис. 1).

Лопатки работают в тяжелых условиях высоких температур и нагрузок, поэтому их изготавливают из жаропрочной высоколегированной стали мартенситного класса 15Х11МФ.

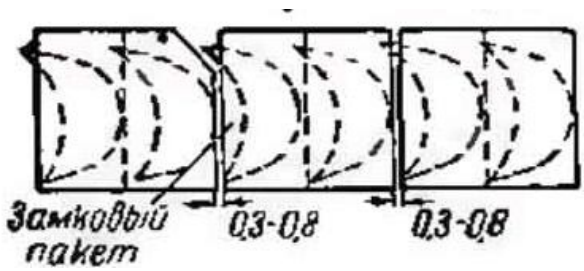


Рисунок 1 – Вид сверху на бандажи сварных пакетов рабочих лопаток с замковым пакетом

Данная сталь относится к трудно-свариваемым сталям при использовании традиционного электродугового способа сварки в защитной среде, поскольку сварка с большой погонной энергией, приводит к перегреву околошовного металла, росту зерна, сегрегациям примесей на границах зерен, способствующих охрупчиванию сварных соединений. Склонность к холодным трещинам и к разупрочнению металла в зоне термического влияния жаропрочных сталей при электродуговом способе сварки обуславливает необходимость предварительного подогрева изделия перед сваркой до 200–300 град.

Применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС) при производстве пакета лопаток вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде позволяет повысить качество, снизить количество брака и себестоимость изготовления.

Высокая концентрация энергии в луче обуславливает высокую скорость сварки и позволяет получать швы не только с минимальной зоной расплавленного металла, но и соединения, в которых металл околошовной зоны не претерпевает значительных изменений вследствие ввода минимального количества теплоты. Малая погонная энергия при ЭЛС способствует снижению зоны термического влияния, исключает недостатки, вызванные изменением физико-механических свойств металла в околошовной зоне. Глубокое проплавление металла при ЭЛС позволяет исключить необходимость выполнения разделки кромок перед сваркой. Кроме того, ввод

меньшего количества тепла дает возможность уменьшить деформации изделий по сравнению с дуговыми способами сварки. Высокий вакуум в камере ЭЛС способствует высокой чистоте сварочной ванны и дегазации сварочного шва.

Сборка лопаток (рис. 2, *а*) в пакеты производится по стыку участков бандажной и хвостовой частей (рис. 2, *б*) ЭЛС на всю глубину без разделки кромок. Для входа и выхода электронного луча предусмотрены технологические платики (рис. 2, *в*), которые удаляются при последующей механической обработке.

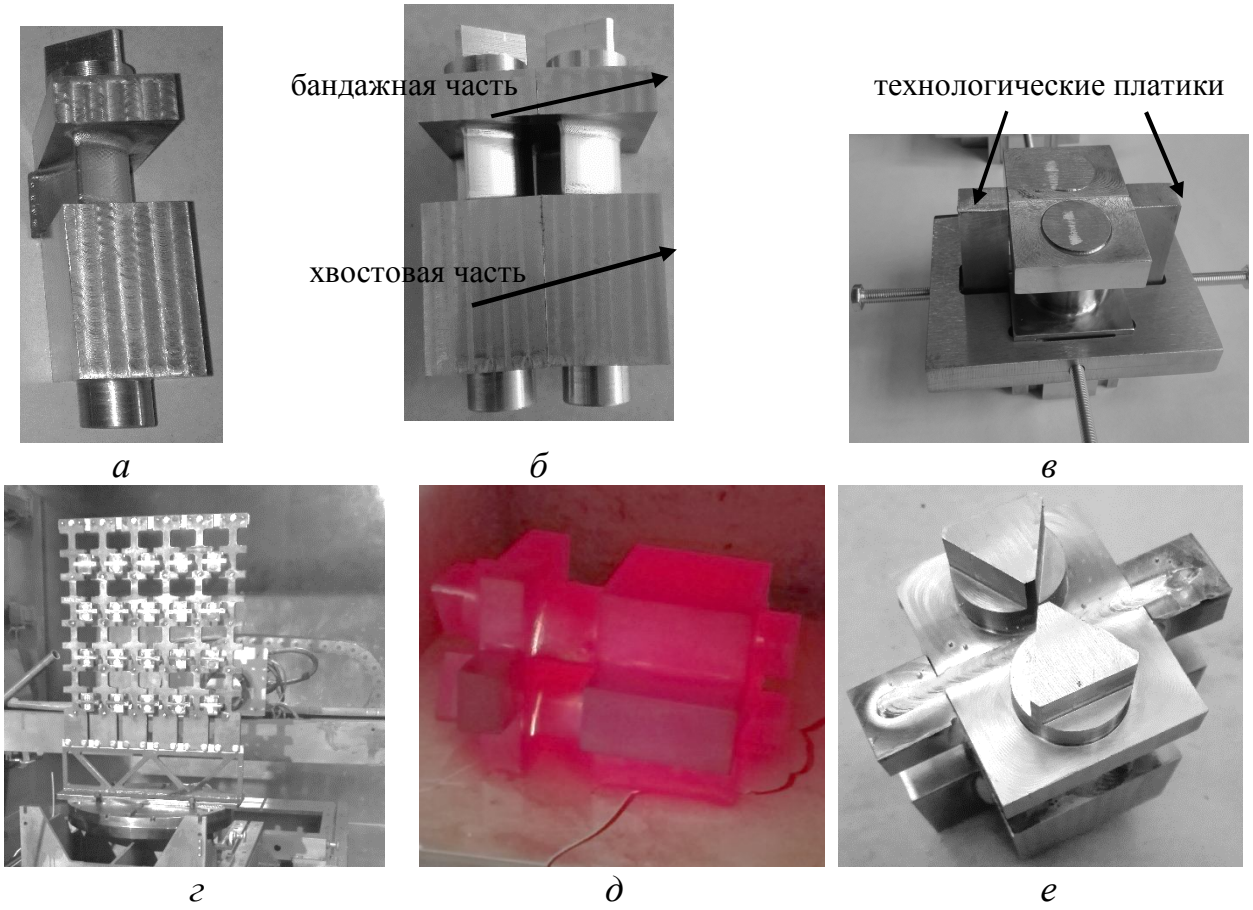


Рисунок 2 – Процесс и оснащение электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин: *а* – лопатка; *б* – пакет лопаток; *в* – сборка в кассеты пакетов лопаток турбин с технологическими платиками; *г* – многоместная технологическая оснастка с кассетами в камере; *д* – термообработка пакета лопаток для снятия внутренних напряжений после сварки; *е* – пакет лопаток после сварки и термической обработки

Пакет, состоящий из двух лопаток и технологических платиков, собирается и базируется в кассету (рис. 2, *в*), которая устанавливается в многоместной технологической оснастке (рис. 2, *г*). Разработанная многоместная технологическая оснастка позволяет автоматизировать процесс ЭЛС и производить до 40 пакетов лапоток за

одну установку. Учитывая повышенную склонность к хрупкому разрушению жаропрочных сталей мартенситного класса после сварки, пакеты лопаток после ЭЛС незамедлительно подвергаются термической обработке (отпуску) для снятия внутренних напряжений и формирования требуемых механических свойств (рис. 2, *д*). Далее пакет лопаток (рис. 2, *е*), поступает на окончательную механическую обработку, где удаляются платики и окончательно формируются посадочные и присоединительные места, выдерживая требуемые размеры и допуски.

После ЭЛС и снятия внутренних напряжений проводятся дополнительные контрольные измерения геометрии деталей и определяются зоны термической деформации.

Измерения до сварки и после производятся путем лазерного сканирования геометрии пакета лопаток с помощью координатно-измерительной руки NikonMetrology MCAx40+ с последующим компьютерным анализом полученных результатов в прикладной программе Focus. Числовые значения отклонений определяются в автоматическом режиме и представлены в виде цветовой карты отклонений (рис. 3).

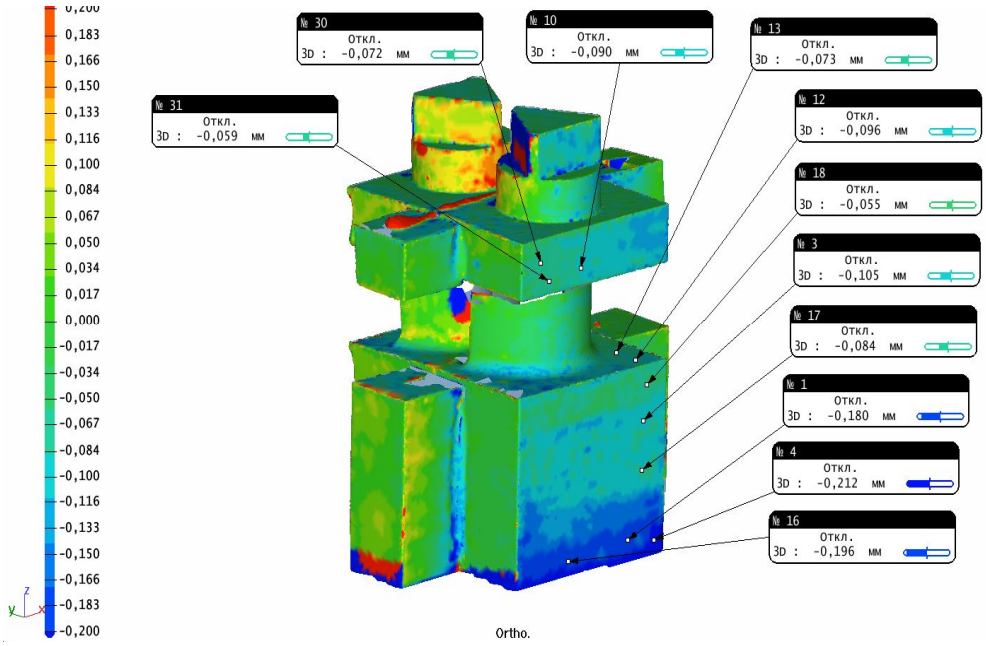


Рисунок 3 – Цветовая карта измерений зон термической деформации

В бандажном шве пакета лопаток деформация практически отсутствует (максимальное отклонение 0,09 мм).

Максимальная зона термической деформации при ЭЛС выявлена в хвостовом шве в верхней его части и составляет 0,212 мм, а в

зоне корня шва термическая деформация незначительна (максимальное отклонение 0,096 мм).

Термические деформации укладываются в пределах допуска по данной операции и полностью исключают последующую механическую обработку.

Разработанный технологический процесс и средства оснащения для изготовления пакета лапоток паровых турбин с рассчитанными режимами ЭЛС позволили повысить качество и снизить себестоимость сборки.

Бородавко В.И., Грецкий Н.Л., Пынькин А.М.,
Хейфец М.Л. ГНПО «Центр» НАН Беларуси,
Волотовский Ф.А., Корзун А.Е. ОАО «ОКБ Академическое»
НАН Беларуси, Минск, Беларусь

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ И УПРОЧНЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Разнообразие условий работы машин и видов изнашивания деталей обусловило появление множества методов восстановления и упрочнения изношенных поверхностей, а также их комбинаций. Сочетание в технологическом процессе восстановления различных методов упрочнения и обработки, а в рамках самих методов комбинации разнообразных технологических воздействий позволяет значительно сократить энерго и трудозатраты при нанесении покрытий.

Предложен комплексный метод восстановления и упрочнения с применением электрофизических источников энергии. Суть данного метода заключается в избирательно-комбинированном сочетании разнообразных технологических воздействий. Физико-механические свойства получаемых покрытий формируются в процессе наплавки легированных ферромагнитных порошков (ФМП), с возможностью одновременного поверхностно-пластического деформирования (ППД), а геометрические характеристики формируются в процессе наплавки низколегированной углеродистой проволоки, при совмещении с упрочняюще-размерным ротационным резанием.

Блок схема установки реализующего комплексный метода упрочнения и восстановления поверхностей деталей машин показана на рис. 1. Разработанная электронная схема установки позволяет изменять вольт-амперные характеристики технологического источника, что дает возможность от одного сварочного трансформатора наносить ФМП и осуществлять последующую наплавку проволоки. Установка имеет возможность совмещать процесс упрочнения деталей ФМП в электромагнитном поле с ППД, а последующую наплавку низколегированной проволоки в среде защитного газа или флюса совмещать с ротационным резанием.

Для устойчивости процесса и обеспечения качества формирования покрытий ФМП в электромагнитном поле установка подключается по схеме, когда электрический ток и магнитная индукция имеют направление от полюсного наконечника к детали.

Установка позволяет получать различные по физико-механическим свойствам и технологическому применению покрытия в зависимости от фазового угла смещения напряжений, питающих электромагнитную катушку и сварочный трансформатор. Для упрочнения поверхностей с последующей обработкой до первоначального размера, когда остается только диффузионный слой, применяется режим обработки, в котором напряжение, питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения, питающего электромагнитную катушку, на угол 60° – «Вариант I».

Режим, в котором напряжение, питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения, питающего электромагнитную катушку, на угол 120° – «Вариант II», рекомендуется для восстановления и упрочнения, изношенных до 0,3 мм поверхностей деталей в сочетании с ППД.

Режим, когда отсутствует фазовое смещение напряжения, питающего сварочный трансформатор, относительно напряжения, питающего электромагнитную катушку – «Вариант III», целесообразно использовать при комбинированном восстановлении и упрочнении поверхностей деталей машин со значительным износом до 1,5 мм при последующей наплавке низколегированной углеродистой проволокой. Совмещение наплавки низколегированной углеродистой проволоки в защитной среде с термомеханической обработкой ротационным инструментом в момент кристаллизации наплавленного слоя благоприятно сказывается на уменьшении количества или размера пор, трещин и на увеличении усталостной прочности деталей.

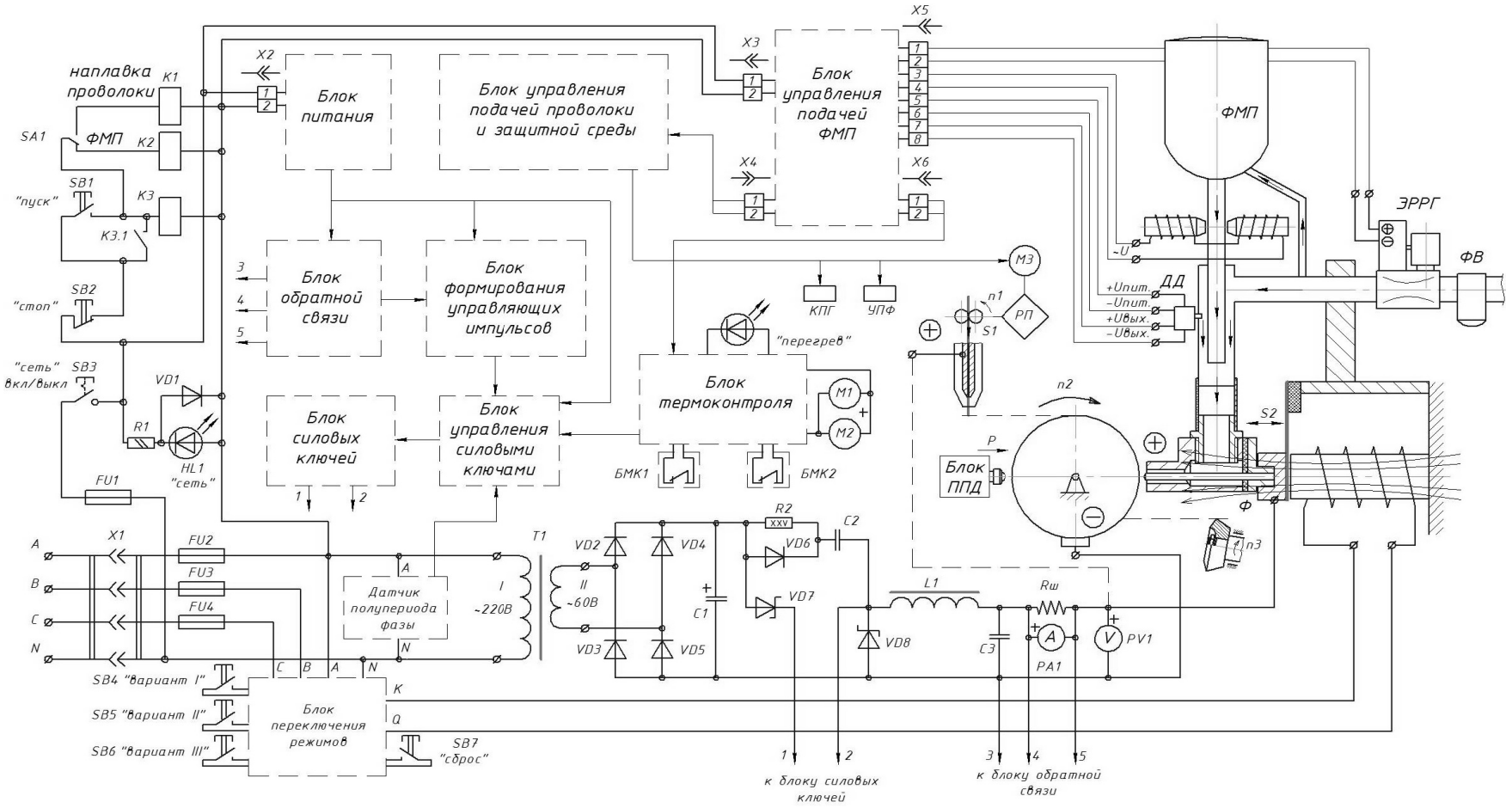


Рисунок 1 – Принципиальная блок-схема установки: X1-X6 – электрические разъемы; ФВ – фильтр влага-отделитель; ЭРРГ – электронный регулятор расхода газа; ДД – датчик давления; М1 и М2 двигатели вентиляторов охлаждения силовых диодов и блока силовых ключей соответственно; М3 – двигатель протяжки проволоки для наплавки; РП – редуктор протяжки проволоки; БМК1 и БМК2 биметаллические контакты силовых диодов и блока силовых ключей соответственно; КПГ – клапан подачи газа; УПФ – устройство подачи флюса; К1-К3 электромагнитные реле управления; Т1–сварочный трансформатор; SA1–переключатель режима нанесение ФМП или проволоки; SB4–SB4 выбор варианта упрочнения

Использование ротационного резца в качестве деформирующего инструмента позволяет не только улучшить физико-механические характеристики наплавленного слоя, но и обеспечить путем завальцовывания впадин между сварочными швами, залечивания пор и трещин геометрические параметры качества, резко сокращающие последующую механическую обработку.

Таким образом, установка для комплексного упрочнения и восстановления с применением электрофизических источников энергии дает возможность не только обеспечить нужные геометрические характеристики поверхности при восстановлении, но и повысить физико-механические свойства материала поверхностного слоя при упрочнении.

Бурыкин В.В., Рыжов Ю.Э. Институт сверхтвердых материалов им В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ РЕЗЦАМИ ИЗ ПСТМ

В настоящее время для чистовой расточки деталей на токарных станках, в том числе на станках с ЧПУ, применяют резцы, оснащенные круглыми режущими пластинами из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ). Использование режущих пластин из ПСТМ, несмотря на их высокую стоимость, снижает себестоимость обработки за счет обеспечения высокого качества обработанных поверхностей деталей. При обработке деталей из труднообрабатываемых материалов (закаленных сталей, высокопрочных и отбеленных чугунов, износостойких наплавленных и напыленных покрытий) режущий инструмент подвергается сложному силовому нагружению, что обусловливает необходимость выполнения ряда требований к его конструкции. Во многих случаях расточка отверстий сопровождается повышенным уровнем вибраций режущего инструмента, что снижает его стойкость и затрудняет достижение высокого качества обработанной поверхности. Снизить уровень вибрации можно различными способами, в том числе путем создания в державке инструмента напряжений, обратных по знаку тем, которые возникают в ней в процессе резания [1]. Спроектирован расточной резец (рис. 1) с системой стержней, которые за счет резь-

бовых стержневых соединений создают в верхней части державки напряжения сжатия, а в нижней – растяжения [2]. Регулируя натяжение стержней, можно добиться наименьших значений вибраций и создавать ограничение по допустимому их уровню.

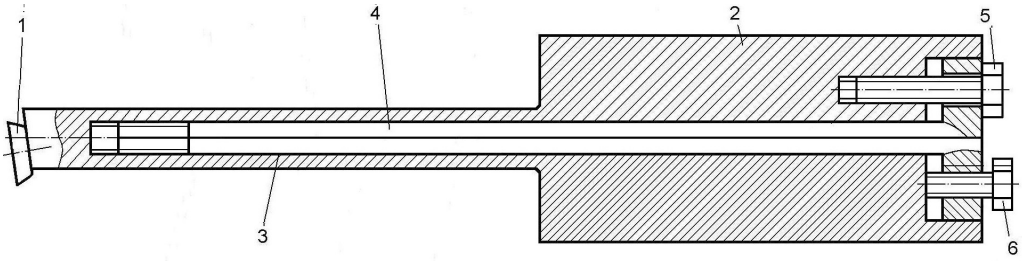


Рисунок 1 – Расточной резец:
1 – режущая пластина; 2 – державка; 3, 4 – стержни; 5, 6 – болты

Режущий инструмент содержит сменную режущую пластину 1, соединенную с державкой 2, в отверстии которой установлены стержни 3 и 4, расположенные по разные стороны от нейтральной линии, один из которых взаимодействует с узлом сжатия, а второй – с узлом растяжения. Стержни представляют собой полуцилиндры с возможностью проскальзывания один относительно другого по касательным плоскостям. При этом, один конец стержней-полуцилиндров с помощью совместной резьбы соединен с державкой, второй – с упомянутыми узлами сжатия и растяжения, которые выполнены в виде болтов 5 и 6, завернутых в державке.

С помощью динамометрического ключа в державке создают напряжения сжатия или растяжения, которые в процессе работы резца компенсируют напряжения, формируемые в державке. Снижение уровня вибраций обеспечивает уменьшение интенсивности образования трещин на передней и задней поверхностях режущих пластин инструмента, повышая его стойкость.

Рассмотренным расточным резцом обрабатывали отверстия Ø 10–25 мм в деталях из стали ШХ15 (HRC 48–50) и с восстановленным покрытием порошком ПГ-СР4 (HRC 50–56) и обеспечивали высокое качество поверхности.

Дальнейшее повышение эффективности использования потенциально высоких режущих свойств инструментов из ПСТМ, расширение существующих и определение новых областей их применения возможно лишь на основе всестороннего исследования конструктивных особенностей инструмента.

Литература

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение в 6 т. / Под общей ред. Н.В. Новикова.– Т. 5. Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко.– К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2006.– 316 с.

2. Патент України на корисну модель № 98885. Різальний інструмент / С.А. Клименко, В.В. Буракін, Ю.Е. Рижов. – Бюл. – 2015.– № 9.

Варюхно В.В., Довгаль А.Г., Данилейко О.В.,
Сидоренко О.Ю. Національний авіаційний університет,
Київ, Україна

ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ТА ПОЛІПШЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

В конструкціях сучасних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) для збільшення коефіцієнту наповнення циліндра та більш ефективної продувки циліндрів встановлено по два впускних та випускних клапани [1]. Такі конструктивні заходи суттєво поліпшують паливну ефективність двигунів та потужність, проте ускладнюють проблему герметизації системи клапан-сідло, та підвищення їх зносостійкості.

Сідла клапанів, як і самі клапани, працюють в дуже важких умовах. Температура вихлопних газів в бензинових двигунах може досягати 950–980 ^{o}C. При цьому сідла клапанів піддаються дії циклічних теплових і ударних навантажень, а також хімічній і фізичній дії газів паливної суміші, що відходять.

Основні експлуатаційні і технологічні вимоги, що пред'являються до матеріалів для сідел клапанів:

- твердість, співрозмірна з твердістю клапана (35-40 HRC);
- зносостійкість в умовах сухого тертя при температурі 600 ^{o}C для випускного сідла клапана;
- термостабілізація матеріалу по структурі і механічним властивостям в діапазоні робочих температур;
- корозійна стійкість, жаростійкість під дією вихлопних газів;
- достатня теплопровідність, що забезпечує швидке відведення тепла від робочої фаски сідла;
- технологічність виготовлення і добра механічна обробка.

Для виробництва сідел клапанів ДВЗ використовується широкий саектр матеріалів, як метаоічних так і керамічних [2, 3]. Одночасно з технічними вимогами до матеріалів виносяться і економічні вимоги – мінімальна вартість складових компонентів, мінімальна їх кількість та найдешевша технології їх отримання.

У якості основи матеріалу для сідел клапанів найбільш пасує карбід хрому, що легко добувається карбюризацією оксиду хрому, тому що карбід хром поєднує помірний комплекс властивостей твердості, жаростійкості поряд з технологічними припрацьовуваності та легкості обробки. Для підвищення щільності матеріалу в нього варто вводити металевий складник в якості основи якого обрано жароміцний та коррозійно-стійкий нікель. Технологія отримання матеріалу спікання в неконтрольованій атмосфері.

Таким чином мета майбутніх досліджень з'ясувати склад та технологічні особливості отримання композиційного матеріалу та визначення його властивостей в умовах високотемпературного фреттинг зношування, що максимально близко моделює умови роботи пари «клапан-сідло». Отже, така система та технологія отримання матеріалу дозволить отримати достатню кількість однотипних кільцевих виробів для подальшої їх обробки та встановлення у якості сідел клапанів сучасних ДВЗ з метою підвищення їх ресурсу та паличної ефективності

Література

1. Моделювання триботехнічних характеристик захисних покриттів для деталей силових установок авіаційної наземної техніки / М.Ф. Дмитриченко, А.Г. Довгаль, О.М. Білякович та ін. // Проблеми трибології. – № 1. – 2017. – С. 49–58.

2. Патент № 2180015 C22C33/02, C22C38/16 Российской Федерации Порошковый материал для изготовления седел клапанов двигателя внутреннего сгорания / В.А. Руденко, С.З-О. Джафаров, Г.Н. Кулешова. – Бюл. – № 38.

3. Патент № 53010 Композиційний зносостійкий матеріал на основі карбіду кремнію / А.Г. Довгаль, А.П. Уманський, О.А. Тамаргазін та ін. – Бюл. – 2010. – № 18.

Гуцаленко Ю.Г. НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ РАСШИРЕННОЙ АДАПТАЦИИ К АЛМАЗНО-ИСКРОВОМУ ШЛИФОВАНИЮ

Современные подходы к организации и реализации технических систем и технологий шлифования интегрируют достижения прикладной механики, физических наук, материаловедения и других смежных отраслей изучения и развития материального мира. Уже историческим и вместе с тем современным примером такой интеграции является метод алмазно-искрового шлифования (АИШ), шагнувший в мир техники и технологий из основанной М.Ф. Семко харьковской научной школы физики процессов резания.

Сущность метода заключается в целенаправленной инициации электрических разрядов в зоне резания введением в нее дополнительной энергии в форме импульсов тока определенной мощности, формы, продолжительности и частоты, а также использовании разрядных эффектов в скользящих (стружечных) электрических контактах постоянного тока, с наложением ультразвуковых колебаний, в среде простых, технически и экологически безвредных смазывающе-охлаждающих жидкостей, или без таковых, в том числе с применением сухих твердых смазок.

Подготовка к АИШ технической системы, включающей станок и инструмент, заключается в создании защищенной от корпуса станка электрической цепи инструмента с токопроводной основой рабочей поверхности (алмазный круг на металлической связке) и обрабатываемой заготовки из токопроводящего материала, замыкание которой обеспечивают стружечные и (или) разрядные контакты в зоне резания. Конвенциональные подходы к подводу потенциала зажигания электрических разрядов по методу АИШ используют для этого шпиндельный узел инструмента (шлифовальную бабку) и узел размещения заготовки (бабку или стол).

Следуя технологической идее метода АИШ, в использовании электрических источников постоянного тока анодный вывод предназначен инструменту, а катодный – заготовке. Конструкторская модернизация для включения в электрическую цепь инструмента произво-

дится защитой специальной электроизоляцией установочных мест его размещения и организацией места закрепления щеточного контактного устройства, заготовки – организацией устройства для закрепления проводного контакта с источником электрического тока. При этом основное внимание разработчиков уделяется организации токоподвода в зону резания со стороны ответственного за качество обработки инструмента.

В конвенциональных практиках организационно-технического обеспечения операций АИШ, как в специальном станкостроении, так и при специальной модернизации универсального оборудования его потребителями, предусматривается введение в базовую конструкцию шпинделя станка дополнительных нетокопроводных элементов (деталей), обычно из текстолита, или покрытий, служащих барьером электрическому току в функционально запрещенных направлениях (на корпус станка).

Конструктивно задача принуждения зоны шлифования к участию в электроразрядной цепи АИШ при соответственно организованном токоподводе к участникам электрического контакта, помимо организации токоподвода, в принципе может решаться одним лишь рациональным использованием электроизоляционных материалов как поверхностных покрытий в производстве металлических корпусов инструментов или в цельнотельном производстве отдельных деталей инструментальных систем без изменения их конструкции, как это возможно [1] с использованием торцевых планетарно-шлифовальных головок. Такой подход к универсализации металлорежущего оборудования и алмазно-абразивных инструментов на металлических связках для возможности их использования в процессах электрофизико-химической обработки, как конструктивно максимально облегченный, несомненно, заслуживает повышенного внимания практических специалистов, особенно по мере появления новых изоляционных материалов повышенной прочности и износостойкости.

Конструктивно необходимое для шлифовального круга, имеющего металлическую основу, отсутствие электрической связи с корпусом станка в соответствии с технической идеологией АИШ в общем случае может обеспечиваться специальной конструкцией инструмента с использованием локальных покрытий, барьерных электрическому току в посадочном и крепежном контактах на шпинделе. Это могут быть те же покрытия, что и в токоизоляционной реконструкции станков.

Разрабатываемый в НТУ «ХПИ» конструктивно-технологический подход к проектированию и производству алмазных шлифовальных кругов с локальной электроизоляцией для их расширенной адаптации к АИШ не требует передела шпиндельного узла универсального станка его потребителем или производителем. Это особенно важно для расширения технологических возможностей универсальных шлифовальных станков включением в станочную систему источника-генератора технологического тока и обеспечением токоподвода в зону резания в условиях механообрабатывающих производств, так как адаптированный к АИШ инструмент не требует передела шпиндельного узла универсального станка с вмешательством в его формообразующую точность, обеспеченную в условиях специализированного станкостроительного предприятия.

Литература

1. Гуцаленко Ю.Г. Доцільність і особливості організації торцевого планетарного шліфування у електрофізикохімічних технологіях // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва. – 2010. – Вип. 106. Техн. сервіс АПК, техніка та технології у с.-г. машинобудуванні. – С. 134–140.

Девин Л.Н., Рычев С.В. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины,
Кирдан О.Ю. НТУ Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина

ИЗУЧЕНИЕ СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАСТИКА МЕТОДОМ ТОНКОГО АЛМАЗНОГО ТОЧЕНИЯ

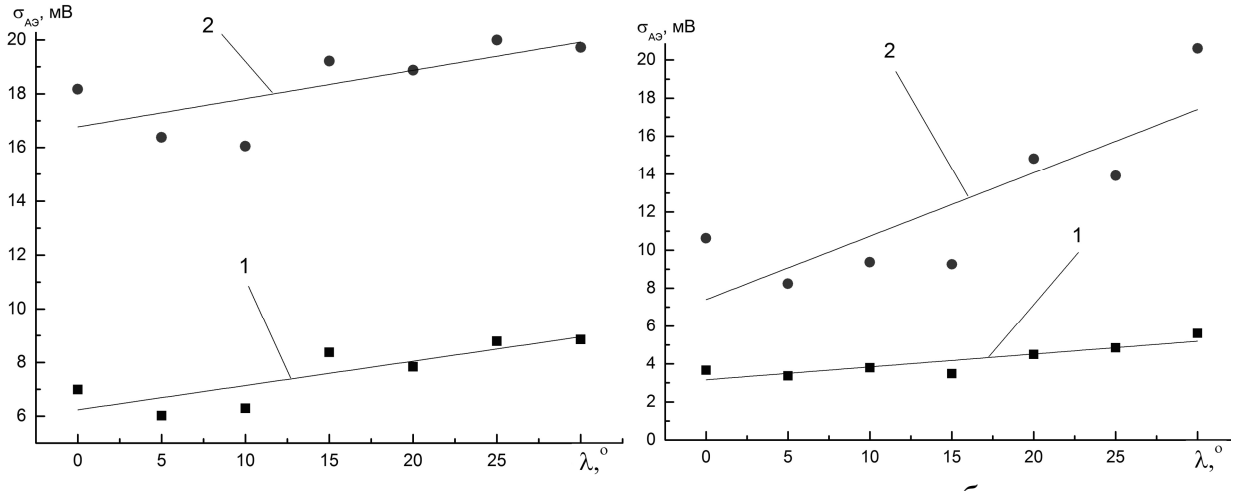
Алмазные природные и синтетические резцы наиболее эффективно применять при обработке деталей, изготовленных из пластичных цветных металлов и сплавов, а также металлов и неметаллических материалов, обладающих высокими абразивными свойствами, при обработке которых другие сверхтвердые материалы не обеспечивают требуемой точности или шероховатости поверхности [1]. К неметаллическим материалам обрабатываемым таким мето-

дом можно отнести полимерные стекла (поликарбонат), полистирол. Основными изделиями, производимыми из них, являются линзы очковой оптики, интраокулярные линзы, линзы объективов фотоаппаратов и прочие изделия [2]. Говоря об исследованиях, связанных с регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ), можно сказать, что данный вопрос изучен недостаточно. Дополнительные экспериментальные исследования могут позволить повысить качество и точность, стойкость инструмента, а также сравнить закономерности обработки природным и синтетическим монокристаллическим алмазным резцом.

Для изучения процесса тонкого косоугольного точения оптического пластика монокристаллами алмаза в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины была использована автоматизированная система измерения сигналов АЭ и сил резания [3] и специальная конструкция резцедержателя [4].

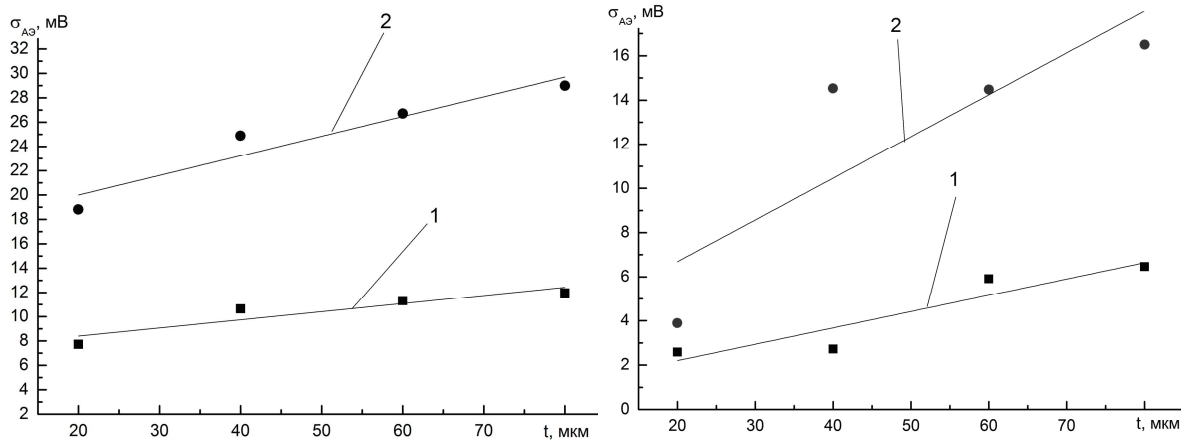
В ходе экспериментального исследования было установлено влияние угла наклона режущей кромки, глубины резания, а также подачи при обработке природным (рис. 1–3, *а*) и синтетическим алмазными резцами (рис. 1–3, *б*) на среднеквадратический сигнал АЭ (1) и детектированный среднеквадратический сигнал (2), при режимах резания $\lambda = 10°$, $S = 6$ мм/мин, $n = 800$ об/мин, $v = 3$ м/с

. Таким образом, в данном экспериментальном исследовании удалось проанализировать влияние угла наклона режущей кромки, а также других технологических параметров на среднеквадратическое значение сигнала акустической эмиссии при обработке поликарбоната, основного материала для производства очковых линз в зависимости от выбранного обрабатываемого материала.



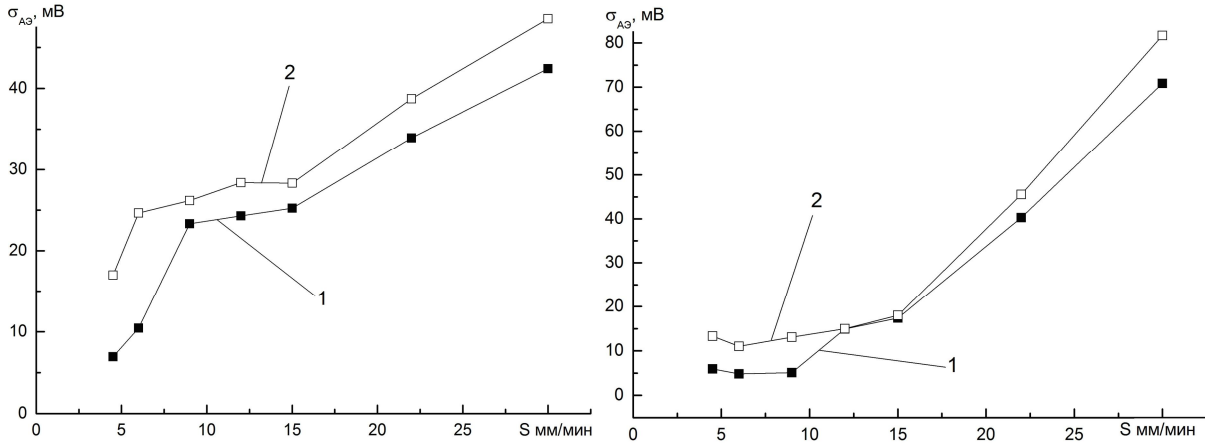
а *б*

Рисунок 1 – Зависимость сигнала АЭ от угла наклона режущей кромки



а *б*

Рисунок 2 – Зависимость сигнала АЭ от глубины резания



а *б*

Рисунок 3 – Зависимость сигнала АЭ от подачи

Можно сделать вывод, что увеличение угла наклона режущей кромки приводит к росту сигнала АЭ как при обработке природным, так и синтетическим алмазным резцом. Увеличение глубины резания приводит к незначительному росту сигнала АЭ при обработке природным алмазным резцом, при обработке же синтетическим алмазным резцом рост сигнала более значителен. Говоря о подаче, видно, что в диапазоне подач 10–15 мм/мин для природного и 12–15 мм/мин для синтетического алмазных резцов характерна стабилизация процесса резания, на всех остальных сигнала растет.

Литература

1. Несмелов А.Ф. Алмазные инструменты в промышленности – М.: «Машиностроение», 1964 –277 с.

2. Plastics and their machining: a review / M. Alluddin et all. // J. of Mat. Proces. Technol. – 1995. – № 54(1-4). – P. 40–46.

3. Девин Л.Н., Стахнив Н.Е, Сулима А.Г. Автоматизированная система для измерения сигнала акустической эмиссии в процессе

прецизионного алмазного точения / Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Мат. 11-го Международ. науч.-техн. семинара, 21–25 февраля 2011г., г. Свалява. – К.: АТМ Украины, 2011.– С. 79–81.

4. Пат. UA 114547 U, B 23 B 27/16. Різальний інструмент / Л.М. Девін, С.В, Ричев. – Бюл. – 2017. – № 5.

Дерев'янченко О.Г., Кожухар Т.В. Одеський національний пол.ітехнічний університет, Одеса, Україна

ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ КЛАСІВ КОМПОНЕНТІВ СТРУКТУР МАТЕРІАЛІВ

В структурі досліджень властивостей матеріалів та станів поверхонь деталей у сучасному матеріалознавстві важливе місце посідає розпізнавання компонентів структур (КС) матеріалів. Відповідні методи, системи та прилади відображені у великої кількості наукових праць вітчизняних та закордонних авторів. Існує низка сучасних спеціалізованих автоматизованих та автоматичних систем для розпізнавання КС. Але у багатьох лабораторіях та підприємствах ще й досі використовують металографічні мікроскопи типу МІМ – 7. На кафедрі ТКММ ОНПУ розроблюється інтелектуальна система розпізнавання класів КС матеріалів, до складу якої входить модернізований мікроскоп МІМ – 7. Система використовується в навчальному процесі кафедри. Її укрупнена структура представлена на рис. 1.

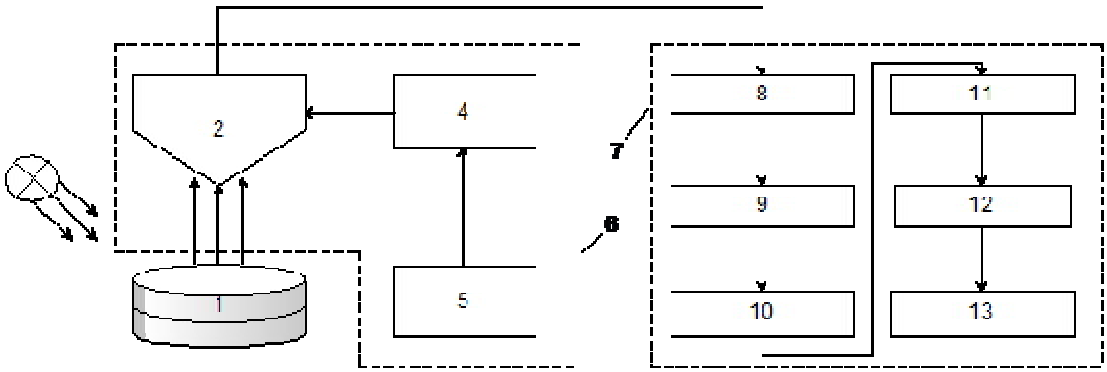


Рисунок 1 – Укрупнена структура інтелектуальної системи розпізнавання класів компонентів структур матеріалів

У структурі визначено такі елементи: 1. шліф матеріалу деталі; 2. цифрова камера СТЗ, що розміщена у тубусі окуляру мікроскопу МІМ - 7; 3. система освітлення поверхні шліфу; 4. підсистема переміщення шліфу; 5. основа та корпус мікроскопу; 6. модернізований мікроскоп мод. МІМ - 7; 7. ПК; 8. програмний модуль попередньої обробки цифрових зображень інформативної зони шліфу; 9. програмний модуль виділення контурів КС; 10. програмний модуль визначення комплексу інформативних параметрів контурів (параметрів форми) КС; 11. програмний модуль визначення комплексу параметрів текстур КС; 12. програмний модуль – комплексний класифікатор для розпізнавання класів КС; 13 – результати розпізнавання (визначені класи КС та параметри якості розпізнавання). Для розпізнавання класів КС використано статистичні методи. Виконано аналіз множини ознак форми s_i ($i = 1 \ldots u$), u – первинна кількість ознак) КС на інформативність з використанням відповідних методів. Внаслідок цього множина ознак скоротилася до розміру u_1 ($u_1 << u$). Кожний КС, що розпізнається, характеризується відповідним вектором $s = (s_1, s_2, s_3, \ldots, s_i, \ldots s_{u1})$ у просторі класів КС (S^{KS}) розмірності u_i. У просторі S^{KS} для ряду матеріалів визначено ділянки, що відповідають множині класів $\Omega_1^{KS}, \Omega_2^{KS}, \Omega_3^{KS} \ldots \Omega_P^{KS}$ та відповідні вирішальні правила, на основі яких будуються комплексні класифікатори КС.

Домуладжанов И.Х., Домуладжанова Ш.И.
Ферганский политехнический институт,
Фергана, Узбекистан

СТОЧНЫЕ ВОДЫ

XX и XXI столетия характеризуются интенсивным ростом населения Земли, развитием урбанизации. Появились города-гиганты с населением более 10-ти млн. человек. Развитие промышленности, транспорта, энергетики, индустриализация сельского хозяйства привели к тому, что антропогенное воздействие на окружающую среду приняло глобальный характер. Повышение эффективности мер по охране окружающей среды связано, прежде всего, с широким внедрением ресурсосберегающих, малоотходных и безотходных технологических процессов, уменьшением загрязнения воздушной среды и водоемов.

Охрана окружающей среды представляет собой весьма многогранную проблему, решением которой занимаются, в частности, инженерно-технические работники практически всех специальностей, которые связаны с хозяйственной деятельностью в населенных пунктах и на промышленных предприятиях, которые могут являться источником загрязнения в основном воздушной и водной среды.

Водоотводящие системы и сооружения - это один из видов инженерного оборудования и благоустройства населенных пунктов, жилых, общественных и производственных зданий, обеспечивающих необходимый санитарно-гигиенические условия труда, быта и отдыха населения. Системы водоотведения и очистки состоят из комплекса оборудования, сетей и сооружений, предназначенных для приема и удаления по трубопроводам бытовых производственных и атмосферных сточных вод, а также для их очистки и обезвреживания перед сбросом в водоем или утилизацией. Объектами водоотведения являются здания различного назначения, а также вновь строящиеся, существующие и реконструируемые города, поселки, промышленные предприятия, санитарно-курортные комплексы и т.п.

Сточные воды – это воды, использованные на бытовые, производственные или другие нужды и загрязненные различными примесями, изменившими их первоначальный химический состав и физические свойства, а также воды, стекающие с территории населенных пунктов и промышленных предприятий в результате выпадения атмосферных осадков или поливки улиц. В зависимости от происхождения вида и состава сточные воды подразделяются на три основные категории:

- бытовые (от туалетных комнат, душевых, кухонь, бань, прачечных, столовых, больниц; они поступают от жилых и общественных зданий, а также от бытовых помещений и промышленных предприятий);
- производственные (воды, использованные в технологических процессах, не отвечающие более требованиям, предъявляемым к их качеству; к этой категории вод относят воды, откачиваемые на поверхность земли при добыче полезных ископаемых);
- атмосферные (дождевые и талые; вместе с атмосферными отводятся воды от полива улиц, от фонтанов и дренажей).

В практике используется также понятие городские сточные воды, которые представляют собой смесь бытовых и производственных сточных вод. Бытовые, производственные и атмосферные сточные воды отводятся как совместно, так и раздельно.

Наиболее широкое распространение получили общесплавные и раздельные системы водоотведения. При общесплавной системе все три категории сточных вод отводятся по одной общей сети труб и каналов за пределы городской территории на очистные сооружения. Раздельные системы состоят из нескольких сетей труб и каналов: по одной из них отводятся дождевые и незагрязненные производственные сточные воды, а по другой или по нескольким сетям - бытовые и загрязненные производственные сточные воды.

Сточные воды представляют собой сложные гетерогенные смеси, содержащие примеси органического и минерального происхождения, которые находятся в нерастворенном, коллоидном и растворенном состоянии.

Степень загрязнения сточных вод оценивается концентрацией, т.е. массой примесей в единицу объема мг/л или г/куб.м.

Состав сточных вод регулярно анализируется. Проводятся санитарно-химические анализы по определению: величины ХПК (общая концентрация органических веществ); БПК (концентрация органических соединений, окисляемых биологическим путем); концентрация взвешенных веществ; активной реакции среды; интенсивности окраски; степени минерализации; концентрации биогенных элементов (азота, фосфора, калия) и др.

Наиболее сложны по составы сточные воды промышленных предприятий. На формирование производственных сточных вод влияет вид перерабатываемого сырья, технологический процесс производства, применяемые реагенты, промежуточные изделия и продукты, состав исходной воды, местные условия и др. Для разработки рациональной схемы водоотведения и оценки возможности повторного использования сточных вод изучается состав и режим водоотведения не только общего стока промышленного предприятия, но также сточных вод от отдельных цехов и аппаратов. Помимо определения основных санитарно-химических показателей в производственных сточных водах определяются концентрации специфических компонентов, содержание которых предопределяется технологическим регламентом производства и номенклатурой применяемых веществ.

Поскольку производственные сточные воды представляют собой наибольшую опасность для водоемов, мы рассмотрим их более подробно. Производственные сточные воды делятся на две основные категории: загрязненные и незагрязненные (условно чистые).

Загрязненные производственные сточные воды подразделяются на три группы.

1. Загрязненные преимущественно минеральными примесями (предприятия металлургической, машиностроительной, рудо- и угледобывающей промышленности; заводы по производству кислот, строительных изделий и материалов, минеральных удобрений и др.).

2. Загрязненные преимущественно органическими примесями (предприятия мясной, рыбной, молочной, пищевой, целлюлозно-бумажной, микробиологической, химической промышленности; заводы по производству каучука, пластмасс и др).

3. Загрязненные минеральными и органическими примесями (предприятия нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, текстильной, легкой, фармацевтической промышленности; заводы по производству сахара, консервов, продуктов органического синтеза и др.).

Кроме вышеуказанных 3 групп загрязненных производственных сточных вод имеет место сброс нагретых вод в водоем, что является причиной, так называемых тепловых загрязнений. Производственные сточные воды могут различаться по концентрации загрязняющих веществ, по степени агрессивности и т.д.

Состав производственных сточных вод колеблется в значительных пределах, что вызывает необходимость тщательного обоснования выбора надежного и эффективного метода очистки в каждом конкретном случае. Получение расчетных параметров и технологических регламентов обработки сточных вод и осадка требуют весьма продолжительных научных исследований, как в лабораторных, так и полупроизводственных условиях. Количество производственных сточных вод определяется в зависимости от производительности предприятия по укрупненным нормам водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности [1, 2].

В табл. 1 приведен утвержденный расход сбросных вод в горканализацию по Кувасайскому АО «KVARTS» с концентрациями вредных веществ по ингредиентам в сточных водах.

Канализационно-экологический норматив (КЭН) загрязняющих веществ в сточных водах необходим не смотря на то, что концентрация вредных веществ от производства не превышают ПДК, кроме азота аммонийного согласно протоколов замеров.

Концентрация аммонийного азота – показатель, указывающий на загрязненность фекальными водами, в которых аммонийные соли образуются при гидролизе мочевины и распаде белка при гниении.

Таблица 1 – Утвержденный расход сбросных вод в горканализацию по Кувасайскому АО «KVARTS»

(Реализуемые этапы плана мероприятий по этапному достижению ПДС веществ. Расход сточных вод – 2394,99 $м^3$/сут)

Показатели	Временно-согласованный сброс		КЭН	
	до 2014 г.		с 2015 г.	
	мг/л	ПДК	мг/л	ПДК
pH	8,0	6,5–8,0	8,0	6,5–8,0
ХПК	108,5	500	108,5	500
Азот аммонийный	4,5	2,5	4,5	2,5
Азот нитридный	1,2	3,3	1,2	3,3
Азот нитратный	3,9	45	3,9	45
Нефтепродукты	0,09	1,0	0,09	1,0
Сухой остаток	980	2000	980	2000
Взвешенные вещества	122,8	500	122,8	500
Хлориды	40,0	350	40,0	350
Сульфаты SO_4	308,5	450	308,5	450
Фосфаты	0,07	2,5	0,07	2,5
Железо	0,18	5,0	0,18	5,0
Щелочность	–	–	–	–
Хром	Отс.	–	Отс.	–
Кальций	Отс.	–	Отс.	–
Магний	Отс.	–	Отс.	–
Фенол	Отс.	0,05	Отс.	0,05

В поверхностных водах аммонийный азот находится, главным образом, в виде ионов аммония и недиссоциированных молекул NH_4OH (класс опасности – 3).

Литература

1. Справочник эколога–эксперта / Н.В. Королева, И.Г. Фахрутдинов, К.В. Ананьева и др. – Ташкент: Госкомприроды Республики Узбекистан, 1997. – 435 с.

2. Справочник эколога–эксперта / Р.С. Хабиров, Н.В. Королева, Т.Р. Ишмухамедов. – Ташкент: Госкомприрода, Госэкоэкспертиза, ООО Кони-Нур», 2009. – 528 с.

Евтифеев С.Л. Одесский национальный
политехнический университет, Одесса, Украина

УПРАВЛЕНИЕ ТРИБОЛОГЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Известны попытки решения технических задач управления свойствами и трибологическими характеристиками поверхности с применением методов химико-термической обработки (ХТО) [1–3]. Однако, задача проектирования поверхности с заранее известными трибологическими свойствами не решена до сих пор. Это связано с тем, что при трении существует большое количество переменных факторов, которые влияют на процесс трения пары материалов.

Целью настоящего исследования является разработка методов управления трибологическими свойствами поверхности при упрочнении методами ХТО. Основными способами ХТО, что применялись в исследовании, были борирование и сульфидирование.

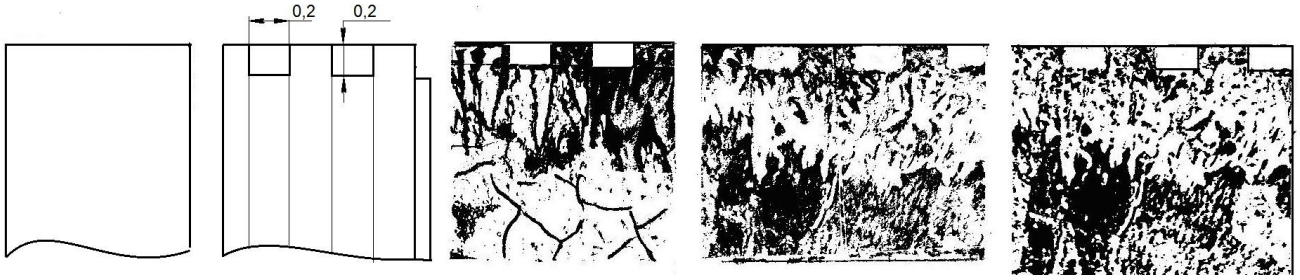
Рабочей научной гипотезой исследования исследование является предположение о том, что принцип Шарпи можно реализовать не только на микроуровне, но и на макроуровне рабочих поверхностей пар трения. Принцип Шарпи положен в основу структуры баббитов. Расположение фаз для обеспечения максимальной износостойкости и антифрикционности наиболее твердые структурные составляющие или фазы должны залегать в виде изолированных друг от друга включений и располагаться в вязкой и мягкой матрице. В классических баббитах, твердая γ-фаза Cu_3Sn расположена в вязкой составляющей твердого α-раствора Sb в Sn и β-фазы SnSb. Причем последняя фаза является хрупкой и в процессе трения выкрашивается. К сожалению, данный принцип применялся только для создания подшипниковых материалов прямых пар трения скольжения, но его можно применять и на макроуровне, а также для обратных пар трения, а также и для других элементов трения.

В качестве критерия износостойкости рассматривалась интенсивность изнашивания, в качестве критерия антифрикционности – коэффициент трения, в качестве критерия прирабатываемости – время приработки. Испытания проводились на машине трения СМЦ – 2 по схеме работы «ролик – колодка» при граничной смазке. Это достаточно жесткие испытания пар трения. Поэтому удельная нагрузка при

трении составляла от 1 до 6 МПа. Скорость трения составляла 2,6 м/с. Определялся весовой износ по разности весов до испытаний и после с точностью до 0, 0001 г. Коэффицикнт трения рассчитывался по моменту трения, а время приработки по устатновившемося моменту трения. В качестве материала колодки применялись следующие материалы: алюминиевый сплав АЛ-30, бронза Бр.ОФ7-2 и подвергнутые обработке по предлагаемой ниже методике. Ролики для испытаний подвергались обработке по предлагаемой методике.

Борирование проводилось в порошковой смеси состоящей из 84% B_4C и 16 % $Na_2B_4O_7$ в течении 5 ч при температуре 930 °С Сульфидирование проводилось в расплавах солей по составу, изложенному в [1]. Изменение температуры сульфидирования позволила получить различные структуры поверхностного слоя.

Сущность процесса управления трибологическим свойствами поверхности заключается в создании на поверхности регулярного рельефа, последующего борирования изделия, удаления выступов рельефа и сульфидирования. Вторым направлением регулирования является специальное травящее сульфидирование заранее полученного боридного покрытий, что показано на рис. 1.



а *б* *в* *г* *д*

Рисунок 1 – Последовательность получения поверхностного слоя:
а – исходная заготовка, *б* – создание регулярного рельефа,
в – борирование, *г* – удаление выступов, *д* – сульфидирование

Регулирование отношения ширины впадин к ширине выступов, шага впадин позволяет в широких пределах изменять трибологические свойства поверхности.

В результате испытаний получены следующие результаты. При применении одноименных пар трения во всем интервале нагрузок интенсивность изнашивания составила 10^{-9}–10^{-12}, что состаляет 9–11 класс износостойкости. При использовании колодок из бронзы Бр.ОФ7-2 и сплава АЛ-30 класс износостоцкости 8–10. Коэффициент трения при использовании одноименных пар трения составил 0,005–

0,008, при контртелах из сплавов уветных металлов – 0,003–0,008. Все результаты зависят от соотношения зон борирования и сульфидирования. Время приработки составляло от 0,5 ч до 2,0 ч. Минимальное время приработки при минимальном количестве боридной фазы или при травящем боросульфидировании при расположении на поверхности сульфилов FeS или $Fe_{1-x}S$, а под ним соответственно бориды FeB и Fe_2B. Обнаружен эффект образования сервовитной пленки на поеврхности сплава АЛ-30 при трении по всем образцам.

Литература

1.А.с. №1006534. Способ химико-термической обработки / Г.В. Земсков, Л.К. Гущин, В.А. Витченко и др. – 1981.

2. Гущин Л.К., Витченко В.А., Евтифеев С.Л. Структура и изностойскость боросудьфидированной стали // Защитные покрытия на металлах: Сб. науч. тр. – 1984. – Вып.18. – С. 31–32.

3. Регулярные защитные композиционные покрытия / Г.В. Земсков, Л.К. Гущин, В.А. Витченко, И.П. Сазонов // Защитные покрытия на металлах: Сб. науч. тр. – 1984. – Вып.18. – С. 28.

Ерёмина М.А., Ломаева С.Ф. Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск,
Паранин С.Н. Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
Тарасов В.В. Институт механики УрО РАН,
Трифонов И.С. Ижевский государственный технический университет им.М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕХАНОСИНТЕЗИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ TiC-Cu

Свойства твердых сплавов на основе карбида титана в значительной степени зависят от технологии их производства. Наилучший уровень свойств достигается при уменьшении размеров частиц и зерна карбида [1]. Для получения гомогенной смеси ультрадисперсного TiC со связующим компонентом используют технологии механохимической активации. Известно, что при помощи механосинтеза карбид титана можно получать без введения твердого ис-

точника углерода - измельчением порошка титана в жидком углеводороде [2,3]. Этот способ позволяет минимизировать загрязнение карбида титана материалом мелющих тел. Однако влияние органических жидкостей на фазовый состав полученных порошков, как правило, не оценивают.

В работе изучено структурно-фазовое состояние композитов, полученных механосинтезом в жидких органических средах (петролейный эфир, ксилол) и последующим магнитно-импульсным прессованием порошков состава TiC(90 об.%)-Cu(Ni,Cr)(10 об.%). Соотношение содержания меди к общему содержанию хрома и/или никеля составляло 80:20. Определены плотность, микротвердость полученных композитов и их абразивная износостойкость по сравнению с промышленными образцами стали У13 и сплава Т5К10 (85 вес.% WC, 6 вес.% TiC, 9 вес.% Co).

Синтез проводили в шаровой планетарной мельнице "Fritsch P-7" в измельчающих контейнерах и с размольными шарами из стали ШХ15. Использовали порошки титана (99,02 вес.%), меди (99,72 вес.%), никеля (99,50 вес.%) и хрома (99,92 вес.%). Синтез проводили в контейнерах, заполненных петролейным эфиром или ксилолом в течение 3 и 6 ч. Образцы, полученные в петролейном эфире обозначены П3 и П6, в ксилоле – К3 и К6, легированные никелем – К6Ni, хромом – К6Cr, никелем и хромом – К6NiCr (цифра соответствует длительности механосинтеза). Магнитно-импульсное прессование проводили при 500 °С в вакууме (остаточное давление 5–10 Па), с предварительной дегазацией в течение 4 ч. Амплитуда импульсов давления составляла ~1,5 ГПа, длительность – 300 мкс. Структурно-фазовое состояние образцов на всех этапах получения оценивали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре MiniFlex (Rigaku) в Co Kα излучении. Измерения плотности прессовок проведены гидростатическим и геометрическим методами. Микротвердость по Виккерсу определена на приборе ПМТ-3 по десяти измерениям при нагрузке 100 г. Абразивная износостойкость оценена методом [4] с использованием электрокорундовых шкурок на тканевой основе КК19XW с разным размером частиц абразива - М40 (28–40 мкм), 4-Н (40–50 мкм) и 5-Н (50–63 мкм). Массовый износ определяли как среднее значение по трем измерениям на аналитических весах ВЛА-200г-М.

Композиты, полученные механосинтезом в петролейном эфире и ксилоле при одинаковой длительности механообработки (образцы П3 и К3, а также П6 и К6), характеризуются близким структурно-

фазовым состоянием (рис. 1 и 2). В составе компактов присутствуют интерметаллиды CuTi и $CuTi_2$, а также фаза карбогидрида титана $Ti_2CH_{0.6}$ с пространственной структурой $P\overline{3}m1$. В компактах из порошков, синтезированных в течение 6 ч, также присутствуют фазы TiC (Fm3m) и α-Fe. Параметр кубической решетки карбида титана снижен вследствие недостатка углерода. Наличие железа в образцах является результатом намола. Добавление никеля и хрома не приводит к изменению фазового состава полученных композитов.

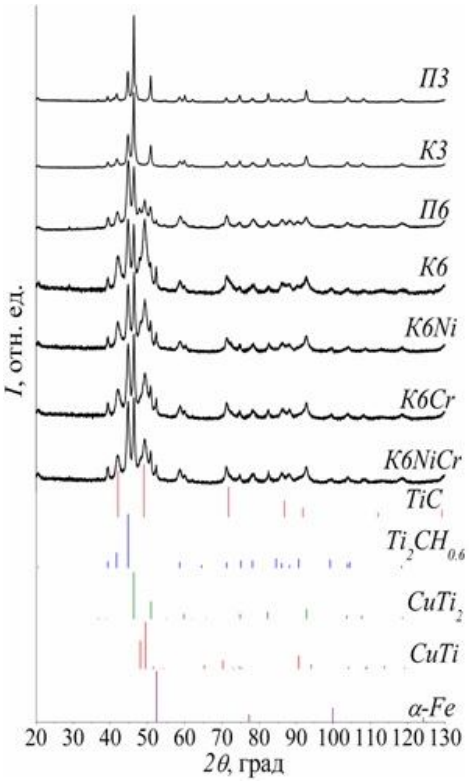


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы композитов

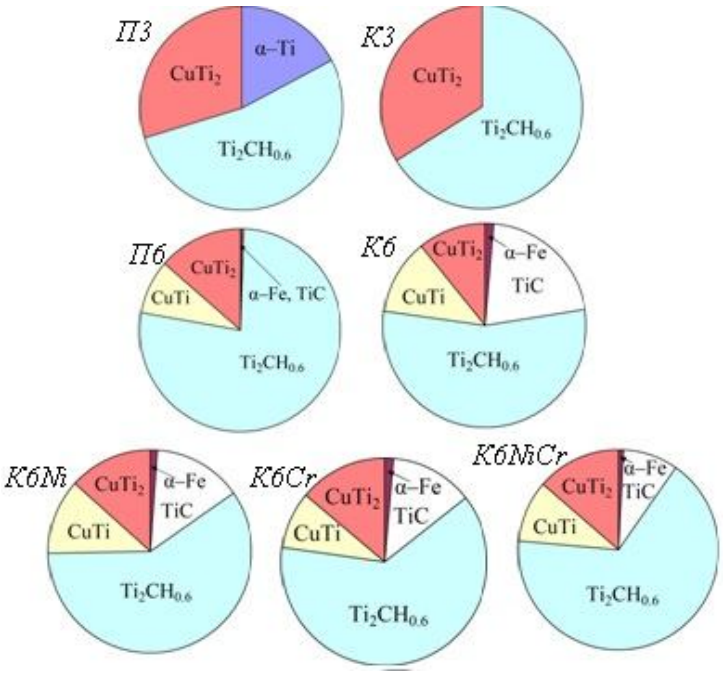


Рисунок 2 – Фазовый состав композитов (об.%)

Плотность и микротвердость полученных прессовок приведены в табл. 1. На основании результатов количественного фазового анализа и известных величин плотности отдельных фаз были рассчитаны значения теоретической и относительной плотностей полученных композитов (см. табл. 1). Плотность компактов составляет 87–95% от теоретических значений. Микротвердость композитов относительно невысока – 4,4–5,2 ГПа, по сравнению с микротвердостью промышленного сплава Т5К10 – 8,2 ГПа.

По-видимому, меньшая микротвердость объясняется как присутствием пор в компактах, так и свойствами самой фазы карбогидрида титана. Литературных данных по микротвердости карбогидридов титана не найдено.

Таблица 1 – Плотность и микротвердость образцов

Образец	ρ (г/см^3)	ρ (%)	HV (ГПа)
П3	4,60(5)	95	5,1(8)
П6	4,51(5)	94	4,4(3)
К3	4,44(5)	91	4,9(4)
К6	4,41(5)	89	5,2(5)
К6Ni	4,39(5)	88	5,0(4)
К6Cr	4,29(5)	87	4,7(3)
К6NiCr	4,28(5)	88	4,4(4)

Значения величин абразивного износа композитов в среднем в 10 раз ниже значений для стали У13 и в 40 раз больше значений для твердого сплава Т5К10 (рис. 3). По-видимому, меньшая износостойкость полученных композитов по сравнению со сплавом Т5К10 обусловлена, прежде всего, природой фазы гексагонального карбогидрида титана.

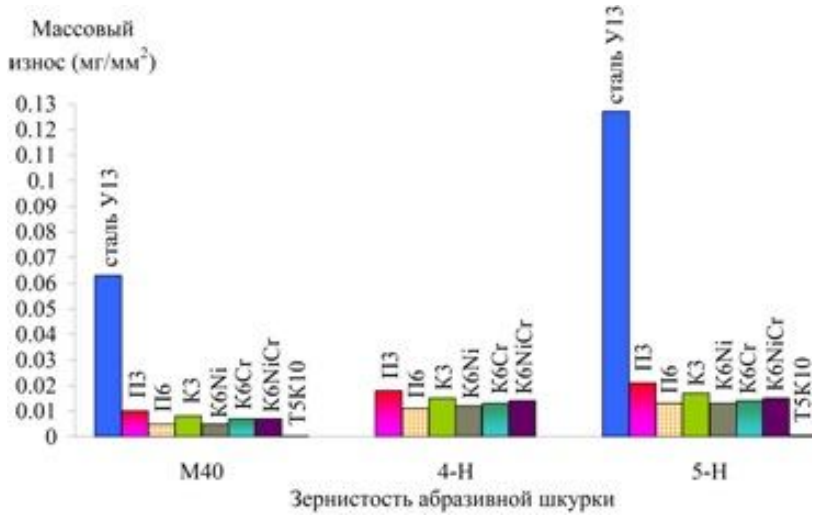


Рисунок 3 – Диаграммы износа композитов

Литература

1. Гарбузова А.К., Галевский Г.В., Руднева В.В., Ширяева Л.С. // Вестн. Сиб. гос. индустр. унив. – 2014. – № 1(7). – С. 34–39.

2. Suzuki T., Nagumo M. // Scr. Metall. Mater. – 1992. – V. 27. – P. 1413–1418.

3. Xiaolong Cui, Yanhua Wang, Lai Wang, Lishan Cui, and Min Qi // Petr. Sci. Technol. – 2001. – V. 19:7-8. – P. 971-978.

4. Тарасов В.В., Лоханина С.Ю., Чуркин А.В.// Зав. лаб. Диагн. матер. – 2010. – т. 76, № 4. – С. 57–60.

Работа выполнена в рамках гос. задания ФАНО России, № гос. регистрации НИР АААА-А17-117022250038-7, частично поддержана Программой Президиума УрО РАН, проект № 15-17-12-26

Ермишкин В.А., Овчинников И.Н., Минина Н.А.,
Ляховицкий М.М., Нестеренко Е.А., Покрасин М.А.
Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН, Московский государственный
технический университет, Москва, Россия

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью настоящей работы послужила разработка метода испытаний на усталость без доведения образцов до разрушения. Применение фотометрического анализа структурного изображения поверхности (ФАСИ) образцов до и после испытания дают возможность сократить серию испытуемых образцов до 3–5. Экспериментальная часть работы выполнялась на образцах алюминиевого сплава АК-4. Метод ускоренных испытаний на усталость основан на двух положениях: 1. Аналитически кривые усталости при числе циклов, соответствующих пределам выносливости можно описать формулой (1), где σ_R – предел усталости при симметрии цикла R, A – константа, зависящая от режима испытания образцов на усталость, t – долговечность образцов при амплитуде цикла $\sigma(t)$. 2. Структурная поврежденность исследуемого материала D_s по данным ФАСИ [1] может быть определена по формуле (2), где: $S_i(t_r)$ – площадь под спектральной кривой яркости отражения белого света от поверхности I – того фрагмента рабочей части образца после его разрушения, $S_i(0)$ – то же, но до начала испытаний, $S_{max}(t_r)$ – площадь под спектральной кривой яркости отражения белого света от поверхности фрагмента с максимальной поврежденностью, $S_{max}(0)$ – то же, но до начала испытаний. Образцы испытывались на вибростоле по схеме

$$\sigma(t) = \sigma_R + \frac{A}{\sqrt{t}}\ ; \tag{1}$$

$$D_s = \frac{S_i(t_r) - S_i(0)}{S_{\max}(t_r) - S_{\max}(0)}, \tag{2}$$

консольного изгиба с жестким закреплением их головок в штоке стола по типу заделки. Перед испытанием и после него обе рабочие поверхности каждого образца сканировали, после чего изображение их поверхности в цифровом коде вводили в персональный компьютер, где оно анализировалось методом ФАСИ. Оценка действующих

напряжений производится по формулам сопромата. Уравнение прогибов образца аналогично таковому для балки равного сечения, закрепленной консольно и нагруженной распределенной нагрузкой по всей ее длине, имеет решение вида:

$$y(z) = \frac{q}{EJ_x}\left(\frac{lz^3}{6} - \frac{z^4}{24}\right), \tag{3}$$

где q – интенсивность распределенной нагрузки, E – нормальный модуль материала образца, l – длина образца, J_x – момент инерции сечения образца относительно горизонтальной оси симметрии. Интенсивность распределенной инерционной нагрузки q определяли по формуле:

$$q = \frac{yEJ_x}{\left(\frac{lz^3}{6} - \frac{z^4}{24}\right)}, \tag{4}$$

после подстановки в него значения $z = 1$ и измеренного значения прогиба свободного конца балки. Ввиду того, что в процессе испытания напряжения изменялись, режимы были приведены к эквивалентным постоянным режимам со средне взвешенными режимами, параметры которых вычислялись по формулам:

$$\hat{v} = \frac{\sum_1^n v_i \cdot t_i}{\sum_1^n t_i}; \tag{5}$$

$$2\hat{A} = \frac{\sum_1^n 2A_i \cdot t_i}{\sum_1^n t_i}; \tag{6}$$

$$\hat{t} = \sum_1^n t_i \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma_0}. \tag{7}$$

Распределение моментов по длине образца, для использованной в эксперименте схеме нагружения, может быть рассчитано по формуле:

$$M(z) = q/2 \cdot (l^2 - z^2). \tag{8}$$

При этом распределение амплитуд по длине образца описывается формулой:

$$\sigma(z) = \frac{M(z)}{W} = \frac{q(l^2 - z^2)}{2W}, \tag{9}$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения образца, определяемого формулой:

$$W = \frac{bh^2}{6}. \quad (10)$$

Располагая функцией распределения моментов по длине образца (8) по формуле (9) можно рассчитать распределение напряжений по длине образца. Оценки усталостной поврежденности образцов, испытанных при консольном изгибе, вычисляют по данным анализа фотометрических измерений, полученных на фрагментах образцов, для которых сняты спектры яркости отражения видимого света от их поверхности до и после испытаний. На рис. 1 показан пример результатов фотометрического анализа. Оценки усталостной поврежденности для фрагментов образцов были получены по формуле (2). Экспериментальные значения долговечности образцов для некоторых значений амплитуд напряжений позволили определить значения долговечности исследованного материала для значений амплитуд, для которых данных испытаний не было. Для этого нужно воспользоваться формулой, полученной из предположения о том, что долговечность образцов обратно пропорциональна значению их поврежденности, определенной по данным ФАСИ:

$$t_{ri}/t_r = D_{sr}/D_{si}, \quad (12)$$

где t_{ri} – долговечность материала при амплитудах напряжений, действующих в i-тых фрагментах образца, t_r – долговечность образца разрушенного при заданном уровне напряжений, D_{si} – значение усталостной поврежденности, определенное по данным ФАСИ в i-том фрагменте образца, D_{sr} – усталостная поврежденность, определенная методом ФАСИ на фрагменте, в котором произошло разрушение образца. Сделав замену переменой $\frac{1}{\sqrt{t}} = x$ в формуле (2) представили ее в виде:

$$\sigma = \sigma_R + B \cdot x. \quad (13)$$

По методу наименьших квадратов были найдены параметры формулы (13).

Аппроксимированная кривая усталости описывается формулой:

$$\sigma = 69{,}208 + \frac{3871A}{\sqrt{t}}. \quad (14)$$

Располагая этой формулой, не составляет труда рассчитать кривую усталости для представления ее в традиционном виде.

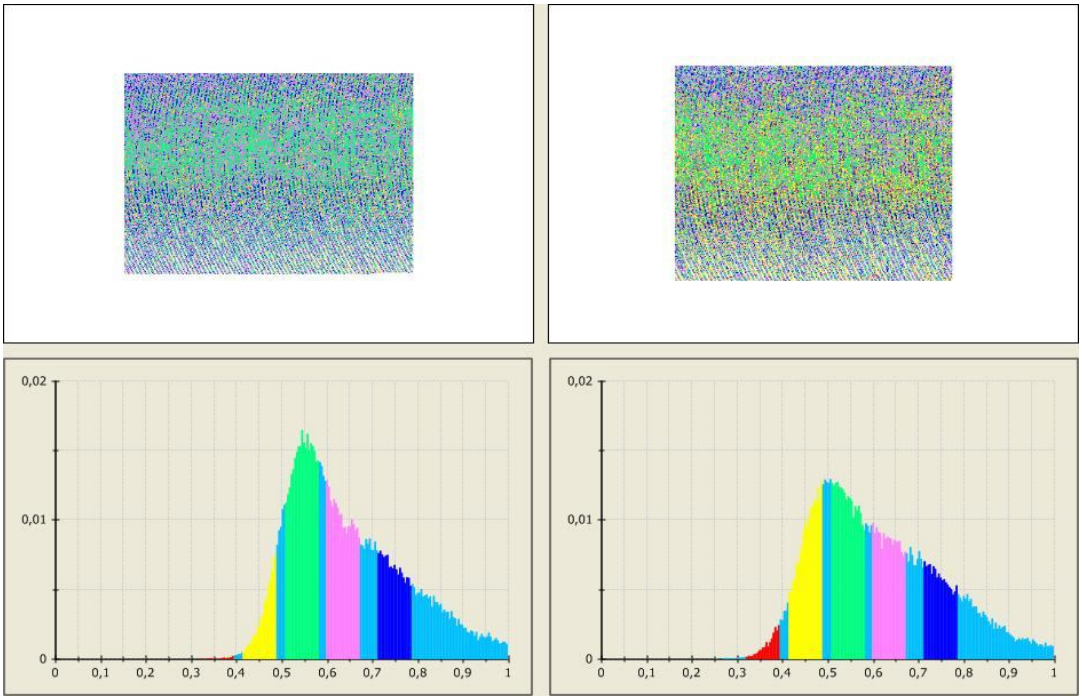


Рисунок 1 – Типичное представление результатов ФАСИ (слева изображение фрагмента поверхности образца и спектр яркости отражения от него видимого света до начала испытаний, справа после испытаний

Выводы:

Разработан способ построения кривых усталости конструкционных материалов по данным испытаний ограниченной серии образцов (2–4) с последующим фотометрическим анализом поверхности образцов. Способ дает возможность избежать доведения образцов до разрушения

Разработанный метод усталостных испытаний с оценкой усталостной повреждаемости по данным ФАСИ имеет неоспоримые преимущества перед стандартной методикой испытания на усталость в отношении экономичности и экономии времени испытаний.

Литература

1. Ермишкин В.А., Мурат Д.П., Подбельский В.В. Система фотометрического анализа структурных изображений и ее применение для исследования материалов в условиях усталости // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 10. – С. 38–44.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 14-08-00417а и 15-08-04272а)

Калашников И.Е., Болотова Л.К., Кобелева Л.И., Колмаков А.Г. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия
Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина
Хейфец М.Л. Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ НАПЛАВОЧНЫХ ПРУТКОВ НА ОСНОВЕ БАББИТА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

По антифрикционным свойствам баббиты превосходят все остальные сплавы скольжения, но значительно уступают им по сопротивлению усталости, что сказывается на общей работоспособности подшипников [1]. Улучшение свойств баббитов может быть достигнуто армированием сплавов микронными частицами и получением на их основе гетерогенных композиционных материалов (КМ). В этом случае совместное действие равномерно распределенных высокомодульных наполнителей и пластичной матрицы может повысить прочность и усталостную долговечность получаемого КМ, не ухудшая при этом антифрикционные свойства. Керамические частицы, такие как SiC, B_4C, TiC, SiO_2, Al_2O_3 имеющие высокую твердость, температуру плавления и высокую стабильность, широко используются в качестве армирующих добавок для упрочнения пластичных матриц КМ.

Рабочий антифрикционный слой из баббита на жесткой стальной опоре подшипника скольжения можно получать методами литья, обработки давлением, газопламенного и плазменного напыления, а также дуговой наплавки. Применение дуговой наплавки, позволяет предотвратить ликвацию упрочняющей фазы за счет формирования покрытий необходимой толщины, характеризующихся высоким уровнем адгезионной связи с подложкой и дисперсностью структуры. Кроме того, высокие, по сравнению с литейными методами, скорости охлаждения позволяют получить дисперсную структуру, что способствует повышению усталостной прочности и, как следствие, увеличению износостойкости. Для наплавки применяют специальные присадочные материалы в виде проволок, прутков и лент.

Целью работы являлась исследование структуры и трибологических свойств композиционных наплавочных прутков, полученных

методом экструзии на основе баббита Б83, армированного керамическими частицами B_4C и SiC.

Для изготовления композиционных наплавочных прутков методом экструзии, применяли смесь порошков из баббита Б83 (10–12% Sb, 5,5–6,5% Cu, основа – Sn) в виде размолотой в порошок стружки, полученной механической обработкой литой заготовки с добавлением частиц карбида кремния в количестве 5 масс.% со средним размером 40 мкм и 0,25 масс.% карбида бора размером менее 1 мкм. Составы и режимы получения полуфабрикатов методом механического легирования в шаровой мельнице представлены в табл. 1. Навески из смесей прессовали вхолодную при усилии 320–340 МПа в пресс-форме, которую затем помещали в муфельную печь, нагревали до температуры 310±10 ^oC, выдерживали в течение 30 мин, и при этой же температуре экструдировали на механическом прессе ОМА (P_{max} – 15 т) при усилии 320±5 МПа. Использовали фильеры диаметром 6 и 3 мм.

Таблица 1 – Составы и режимы получения полуфабрикатов

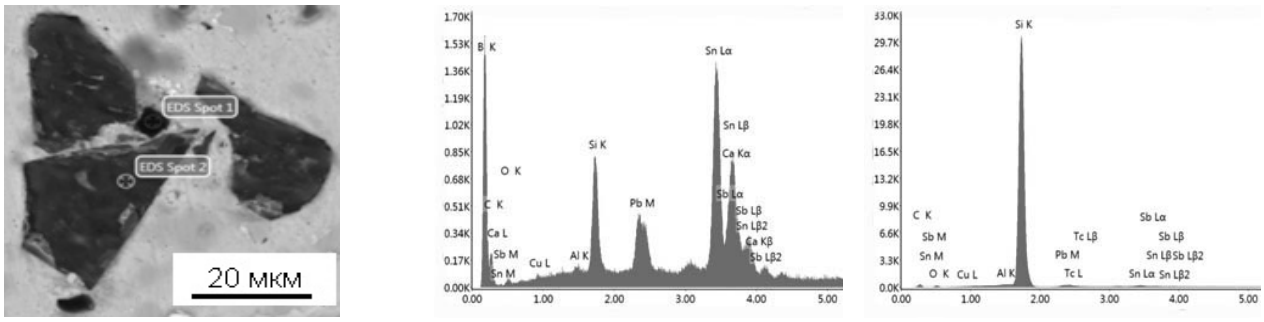
№ обр.	Состав	Режимы механического легирования
1	Б83 литой	–
2	Б83 стружка	200 об/мин, 120 мин
5	Б83 + 0,25 масс.% B_4C + 5 масс.% SiC	200 об/мин, 60 мин + 150 об/мин, 10 мин

Из полученных длинномерных прутков (400–600 мм) готовили образцы для оптической, электронной микроскопии и трибологических испытаний.

Трибологические испытания образцов проводили в условиях сухого трения скольжения на установке CETR UMT Multi-Specimen Test System по схеме палец (образец) – диск (сталь 45) при осевой нагрузке 31 Н в течение 35 мин. Скорость скольжения 0,5 м/с, общий путь трения - 1000 м. Также, поведение образцов при сухом трении скольжении оценивали по величине интенсивности изнашивания I_m и коэффициенту стабильности процесса трения α_{cm}.

МРСА поверхности КМ состава Б83 + 0,25 масс.% B_4C + 5 масс.% SiC показал наличие и распределение в матрице частиц B_4C и SiC (рис. 1). В табл. 2 для сравнения представлены основные свойства литого, полученного по порошковой технологии баббита (обр.1и 2) и композиционного наплавочного прутка на основе баб-

бита, полученного методом экструзии. Данные свидетельствуют о перспективности предложенной технологии и КМ.



а *б* *в*

Рисунок 1 – Структура и МРСА КМ Б83+0,25 масс.% B_4C+5 масс.% SiC.
а – точка 1, *б* – точка 2

Таблица 2 – Сойства баббита

№ обр.	Размер SnSb, мкм	Плотность, г/см^3	Твердость, НВ	Коэффициент трения, f	$I_m \times 10^{-5}$ г/м	α
1	79	7,39	23,6	0,443	1,802	0,792
2	68	7,29	23,3	0,427	1,715	0,821
3	47	6,82	25,6	0,639	1,605	0,887

Литература

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 469 с.

Калентьев Е.А., Тарасов В.В. Институт механики УрО РАН, Ижевск, Россия

УПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО С ПОЛОСТЯМИ В ФОРМЕ ПИРАМИДЫ И ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

Многие тела окружающего нас мира имеют различные полости. Это могут быть полости в грунтах, деталях машин, строительных конструкциях, биологических материалах и т.д. При воздействии нагрузок на такие тела происходит концентрация напряжений вокруг полостей, наблюдается резко выраженное изменение параметров напряженно-деформированного состояния.

Широко известно, что расположение и форма концентраторов напряжений оказывает существенное влияние на величину и распространение местных напряжений [1, 2]. Особенно важно учитывать такое влияние при работе конструкции при циклических и знакопеременных нагрузках [3]. В качестве таких концентраторов напряжений могут выступать различные дефекты, полости и включения. Как правило, в окрестности таких дефектов наблюдается резкое изменение напряженно-деформированного состояния, при этом есть области повышенных, а также пониженных напряжений.

В общем, исследование концентрации напряжений может быть выполнено экспериментально, аналитически и с помощью численного анализа. Отметим, что проведение экспериментов не всегда возможно и обычно трудоемко, а аналитические методы в подавляющем большинстве случаев позволяют получить решение только для достаточно простых случаев.

Представляется интересным, путем предварительного создания системы полостей определенной формы и расположения управлять напряженно-деформированным состоянием конструкций. Например, используя полости добиться снижения действующих напряжений в определенной области.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние упругого изотропного твердого тела в форме цилиндра (диаметр и высота 25 мм) с полостью в форме тонкого прямоугольного параллелепипеда и пирамиды, при этом основание пирамиды совпадает с одной из граней параллелепипеда. Для этого проведем ряд вычислительных экспериментов с использованием свободного комплекса инженерного анализа на базе метода конечных элементов.

В качестве нагрузки принята сосредоточенная сила P=100Н действующая на одном из торцов твердого тела, второй торец и боковая поверхность жестко закреплены. Материал образца − сталь, со следующими характеристиками: модуль упругости $E=2{,}0\cdot10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu=0{,}3$. Система прямоугольных декартовых координат XYZ сориентирована следующим образом: ось Z совпадает с осью цилиндра, области материала соответствуют положительные Z, плоскость XY расположена на нагруженном торце.

На рис. 1 показан график интенсивности напряжений в окрестности полости по оси X_1 проходящей через ее центр, при этом нулевым значениям соответствует область пространства полости.

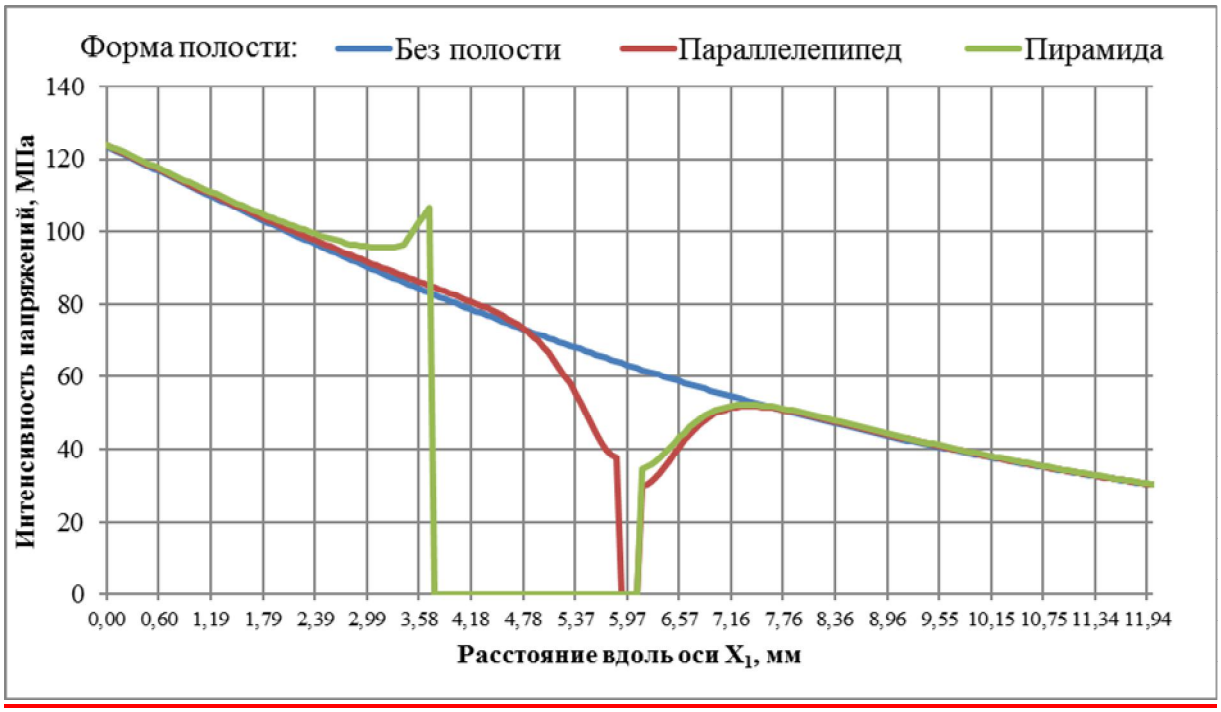


Рисунок 1 − Распределение интенсивности напряжений вдоль оси X_1

Заметим, что распределение интенсивности напряжений на графике правее полостей (отметка 5,97мм) практически совпадает. Это может говорить о том, что влияние полости на возмущение напряженного состояния обусловлено формой и размерами поверхности полости и в случае их равенства равны и вызванные ими изменения напряженно-деформированного состояния при прочих равных условиях.

Литература

1. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – 856 с.

2. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. – М., Физматгиз, 1962. – 456 с.

3. Ильюшин А.А, Ленский В.С. Сопротивление материалов. – М., Физматгиз. 1959. – 371 с.

Кислица М.В., Геворкян Э.С., Прокопив Н.М., Чишкала В.А. Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Al_2O_3–SiC В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДАЦИИ

В настоящее время разрабатывается множество композиционных материалов для режущих инструментов разных типов: оксидные, смешанные, нитридные, армированная. Однако каждый из этих материалов наиболее эффективно работает в определенной узкой области. Традиционно используемые оксидно-карбидные режущие материалы хорошо зарекомендовали себя при обработке высокотвердых сталей и чугунов, однако при скоростях резания выше 200 м/мин сильно повышается температура в зоне резания (1100–1200 °С), что приводит к увеличению износа [1].

В системе Al_2O_3-SiC карбид кремния выступает в качестве армирующего элемента и имеет коэффициент теплопроводности на порядок выше, чем матрицы – Al_2O_3, что повышает теплопроводность композита в целом [2]. Нами были предложены составы Al_2O_3(микро)-SiC(нано). Применение состава именно микро-нано имеет ряд преимуществ, в частности позволяет лучше перемешивать порошки, по сравнению с нано-нано, которые легко агломерируют [3]. Кроме этого, стоимость нанопорошков значительно выше, чем микропорошков.

Известна работа [4], где исследуется состав Al_2O_3–5% мас. SiC после спекания при температурах 1380 и 1430 °С. Мы же в своих исследованиях прессовали разные составы, как по пропорции, так и по фракции компонентов, для получения наилучших характеристик. Прессование осуществлялось на оригинальной установке. Температура спекания варьировалась от 1370 до 1800 °С, что позволило добиться получения наилучших механических свойств.

Таким образом, в результате исследований образцов установлено, что наилучшими характеристиками обладает состав Al_2O_3–15% мас. SiC микро-нано при температуре спекания T = 1400 °С, временем выдержки τ = 3мин, давлении P = 30 МПа. Полученные образцы имеют твердость H_V = 25 ГПа при K_{IC} = 5,5–6,0 МПа·м$^{1/2}$.

Исходя из того, что порошки Al_2O_3 – доступное сырье отечественного производства, режущие керамики на его основе остаются

очень перспективными материалами и требуют последующего изучения, поиска новых добавок и улучшения характеристик уже известных составов.

Литература

1. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: Справ. / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, Г.М. Ипполитов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с. .

2. Yoon-Soo Park, Willardson, Eicke R Weber. SiC materials and devices // Academic Press. – 1998. – P. 1–18.

3. Технология получения, характеристики и некоторые области применения электровзрывных нанопорошков металлов / М.И. Лернер, Н.В. Сваровская, С.Г. Псахье, О.В. Бакина // Российские нанотехнологии. – 2009. – т. 4, № 9.

4. Композиционные керамики на основе оксида алюминия, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания для трибологических применений / М.С. Болдин, Н.В. Сахаров, С.В. Шотин и др. // Физика твердого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – № 6 (1). – С. 32–37.

Клименко С.А. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТОКАРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ cBN

Совершенствование технологий механической обработки изделий из конструкционных материалов, в том числе закаленных сталей, чугунов, твердых сплавов и др., связано с повышением производительности и снижением стоимости обработки за счет увеличения режимов резания, что, в свою очередь, обусловлено созданием новых режущих инструментов с применением высокоэффективных инструментальных композитов, таких как сверхтвердые материалы (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (cBN).

Согласно стандарта ISO 1832-2012, композиты на основе cBN делятся на три группы – BH, BL, BC.

Композиты группы BH – с количеством cBN в диапазоне 70–95 об. %, являются существенно монофазными, но гетерогенными по своей структуре. К группе BL относятся композиты с 45–65 об.% cBN. Матрица, дисперсность структуры которой соответствует субмикронному диапазону, мультифазна и имеет сложный химический состав на основе керамических компонент с TiN, Ti(C, N), TiC, TaN, TiB_2, Si_3N_4, SiC, MAX-фаз. Группа BC объединяет композиты на основе cBN с защитными покрытиями.

Ниже показаны технологические возможности режущих инструментов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе cBN, созданными в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Режущие инструменты, оснащенные композитами группы BH (содержание cBN 75–95%), позволяют эффективно обрабатывать изделия из различных чугунов, легированных сталей высокой твердости, твердых сплавов с содержаний WC > 15%, деталей с напыленными самофлюсующимися покрытиями и наплавленными покрытиями сплавами мартенситного класса высокой твердости.

Для эффективной обработки броней дробилок из литой стали 110Г13Л как по корке, так и после ее удаления, применяются инструменты, оснащенные пластиной RNUN 19070T из композита системы «cBN-AN, AlB_{12}» (содержание cBN 97%). При точении по корке со скоростями резания 70–100 м/мин, с подачами 0,3–0,4 мм/об и глубинами резания до 8–9 мм стойкость резцов составляет 120–180 мин.

Точение деталей, наплавленных сварочными, наплавочными, порошковым проволоками, спеченными лентами, напыленных с оплавлением покрытиями системы Ni-Cr-B-Si, напыленных порошковыми покрытиями с аморфной структурой, инструментами, оснащенными композитами систем «cBN-AN, AlB_{12}», «cBN-Si_3N_4» (содержание cBN 97%), производится со скоростями резания 60–110 м/мин как непосредственно по неровному поверхностному слою, так и в условиях финишной обработки.

В сравнении с керамическими резцами, точение валков из отбеленного чугуна на вальцетокарных станках резцами из ПСТМ системы «cBN-Si_3N_4» выполняется с производительностью большей до 4–5 раз, стойкость инструмента большей в 3,0–3,5 раза. Обработка бочки

валков и ручьев производится со скоростью резания 70–85 м/мин, с глубиной резания 0,2–1,5 мм при стойкости инструмента 125 мин.

Инструменты, оснащенные композитом системы «cBN-Si_3N_4», эффективно обрабатывают детали прокатной арматуры из твердого сплава ВК25, ВК30 со скоростями резания 15–20 м/мин.

Режущие инструменты, оснащенные композитами группы BL (содержание cBN 50-75%), позволяют проводить высокоэффективную чистовую лезвийную обработку изделий из сталей высокой твердости (56–64 HRC).

Режущие инструменты из композитов систем «cBN-TiN», «cBN-TiC» (содержание cBN 50–55 об.%), позволяют выполнять чистовое точение закаленных сталей (ХВГ, ШХ15, 30ХГСА, 40Х, У8) при скоростях резания 180–270 м/мин, что обеспечивает производительность до 9000 $мм^3$/мин. По сравнению с обработкой инструментами из композитов группы ВН скорость изнашивания инструментов в 1,5–5,0 раз ниже, что обусловливает получение обработанных изделий высокого качества при стойкости инструментов 30–45 мин. При скоростях резания более 250 м/мин наиболее перспективно применение режущих инструментов из композитов системы «cBN-TiC», которые по работоспособности соответствуют мировым аналогам (CBN100, SECO, Швеция).

При высокоскоростном точении обеспечивается шероховатость обработанной поверхности *Ra* 0,32–0,63 и *Rz* 4–6, что в ряде случаев позволяет заменить на этапе чистовой обработки операцию шлифовки точением инструментами из композитов на основе cBN.

Обработка изделий, изготовленных из Fe-C сплавов средней твердости (48–55 HRC), проводится инструментами из композитов группы BL со скоростями резания 300–360 м/мин при стойкости инструментов 25–35 мин.

Режущие инструменты, оснащенные композитами переходной группы BL–BH (содержание cBN 70–75 об.%) по интенсивности изнашивания при чистовом точении железоуглеродистых сплавов твердостью 60–64 HRC со скоростями резания 180–270 м/мин превышают на 25–30% интенсивность изнашивания инструментов из композитов группы BL, однако позволяют проводить обработку при динамических нагрузках. В таких условиях обработка инструментами икомпозитов с низким содержанием cBN (50–55 об.%) сопровождается быстрым разрушением режущей кромки за счет микро- и макроскалывания. Точение режущими инструментами из компози-

тов с содержанием cBN 70–75 об.% проводится с подачами 0,2–0,3 мм/об при стойкости инструмента 25–30 мин, что существенно расширяет сферу применения композитов на основе cBN инструментального назначения.

Режущие инструменты, оснащенные композитами группы ВС, эффективно используются при обработке отмеченных выше конструкционных материалов. При этом: – повышается надежность работы инструмента на этапе приработки, что связано с перераспределением и снижение напряжений, которые формируются в инструменте при его термобарическом нагружении; – увеличивается период стойкости инструментов за счет изменения механизма взаимодействия в зоне резания; – обеспечивается информационная функция, связанная с облегчением контроля величины износа инструмента.

Представленные выше инструменты выпускаются в условиях опытно-промышленного производства ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины. Наличие действующего отечественного производства инструментов из ПСТМ на основе cBN является базой для развития современных высокопроизводительных технологических процессов механической обработки, перспективных для инновационного развития промышленности.

Клименко С.Ан., Мановицкий А.С., Копейкина М.Ю., Клименко С.А. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

ТОПОГРАФИЯ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗЦА С РАДИУСОМ ПРИ ВЕРШИНЕ ИЗ ПКНБ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

Износ резцов из ПКНБ вследствие высокой твердости инструментального материала и высокой способности сопротивляться абразивному износу при точении закаленных сталей существенно ниже, чем у твердосплавных и керамических инструментов, поэтому они по праву занимают лидирующие позиции при обработке такого класса конструкционных материалов. Превалирующим видом является износ по задней поверхности, а характерным примером таких поверхностей износа может служить приведенный рис. 1.

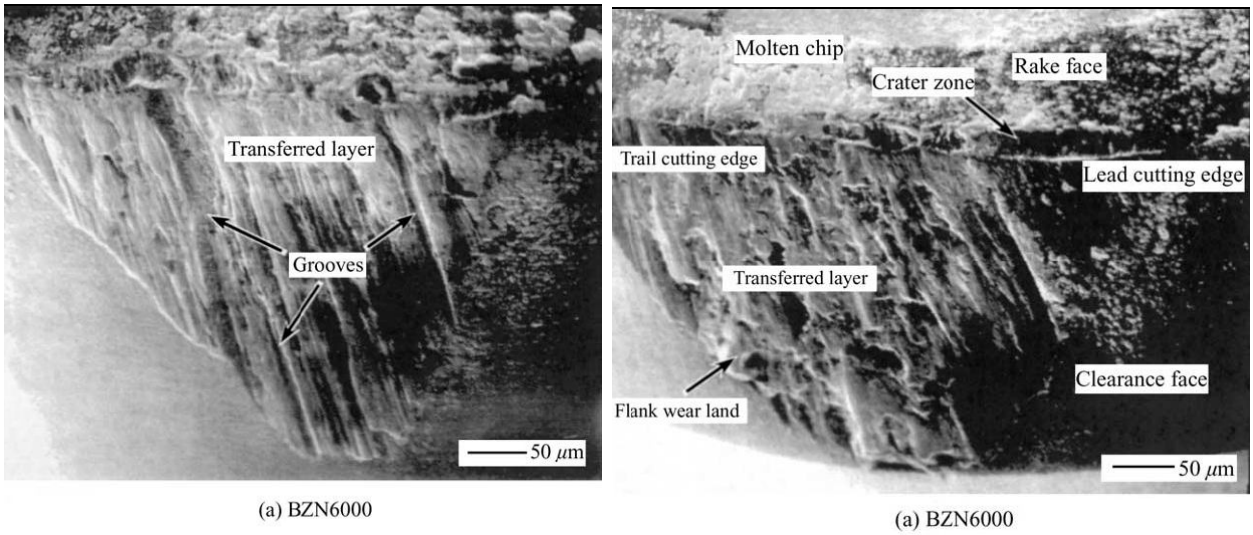


Рисунок 1 – Поверхности изношенных при точении закаленной стали типа ШХ-15 резцов из ПКНБ

Следует отметить наличие на изношенных поверхностях характерных борозд, канавок и выступов, расположенных в направлении вектора скорости резания (в направлении действия силы стружкообразования).

В Институте сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины, благодаря содействию представителей корпорации BRUKER были получены на приборе ContourGT 3D Optical Microscope оптические изображения участка изношенной задней поверхности круглой режущей пластины из кибориита после точения стали ШХ-15, приведенные на рис. 2, где хорошо просматривается радиусный контур режущей кромки. Приведенное к номинальной средней линии (спрямленное путем развертки длины окружности пластины) 3D изображение изношенного участка показано на рис. 3. Такое изображение позволяет количественно определить глубину впадин и высоту выступов по отношению к номинальному положению режущих кромок. Профилограмма, полученная в результате цифровой обработки отсканированных изображений, позволяет увидеть линию выступов и впадин на участке изношенной поверхности пластины. Профилограммы и количественные значения высот выступов и глубин впадин, приведенные на рис. 4, наглядно демонстрируют контур изношенного участка на задней поверхности пластины и показывают, что фактическая площадь контакта резца из ПКНБ с обработанной деталью намного больше номинальной. Это обстоятельство следует принимать во внимание при определении контактных нагрузок на задней поверхности инструмента из ПКНБ и расчете составляющих силы резания.

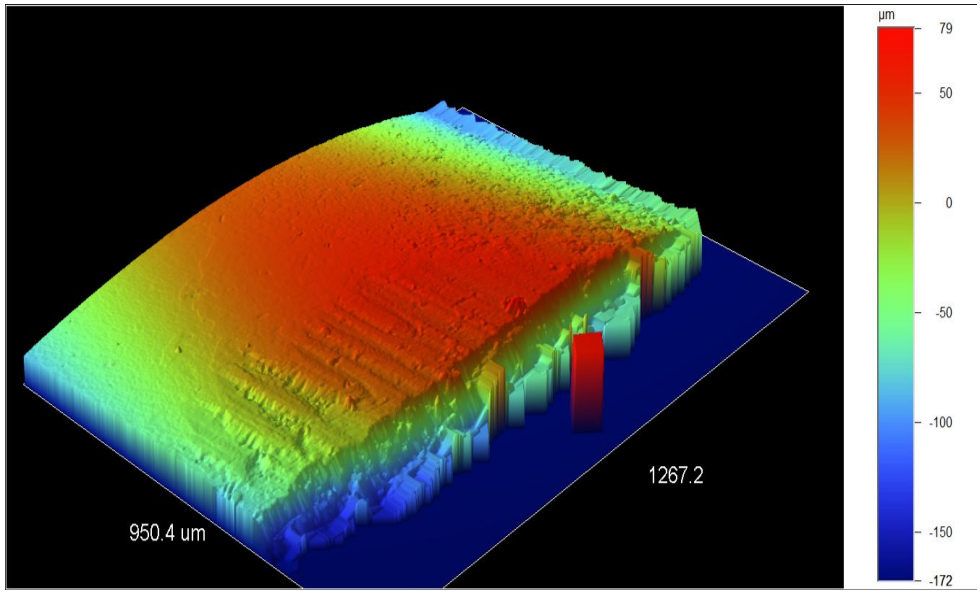


Рисунок 2 – 3D изображение участка изношенной поверхности резца из ПКНБ

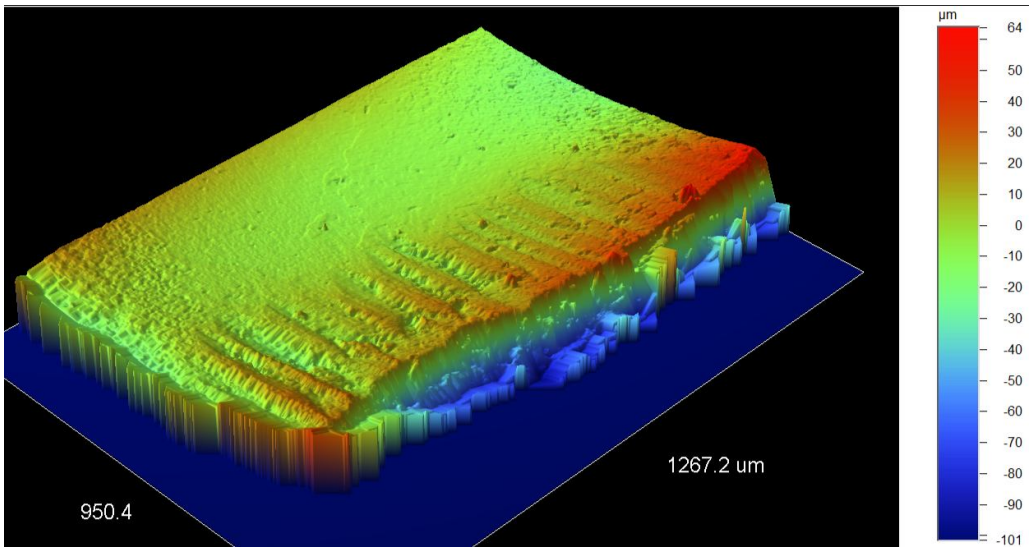


Рисунок 3 – Приведенное к спрямленной режущей кромке 3D изображение изношенного участка задней поверхности резца из ПКНБ

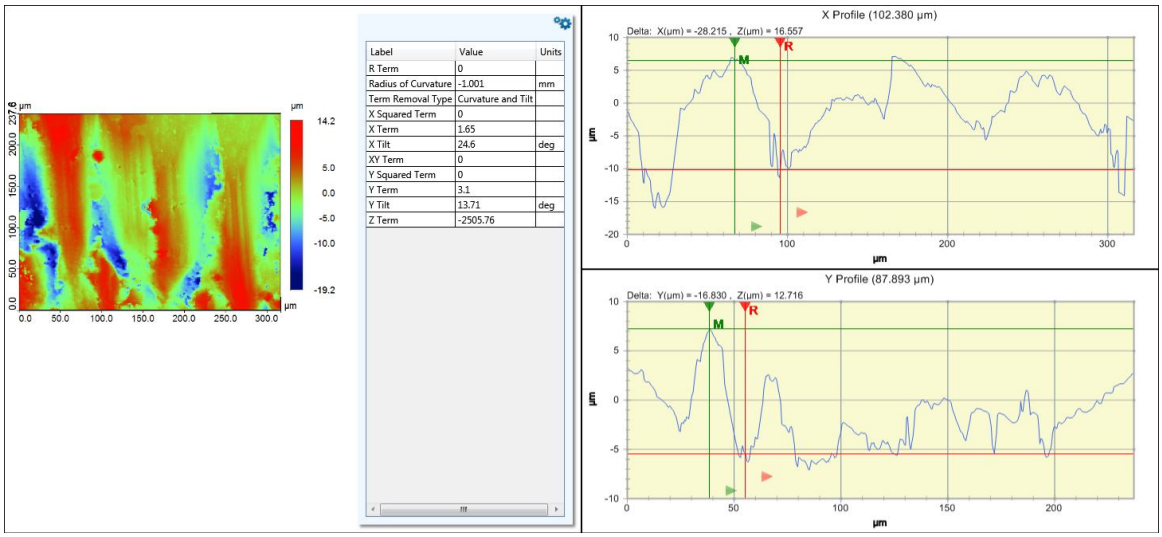


Рисунок 4 – 2D профилограммы изношенного участка резца из ПКНБ

Кодирова Д.Т. Ферганский политехнический институт,
Тухтаев С. Институт общей и неорганической
химии АН Республики Узбекистан, Фергана, Узбекистан

РАСТОРИМОСТЬ В СИСТЕМЕ ХЛОРАТ МАГНИЯ-РОДАНИД АММОНИЯ-ВОДА

Производство наиболее распространенных неорганических дефолиантов достаточно освоены промышленностью. Однако существующий ассортимент их не удовлетворяет современным требованиям сельского хозяйства. Главный недостаток хлоратсодержащих и роданистых дефолиантов в том, что они обладают невысокой дефолиирующей активностью и их «жесткое» действие на растения сопровождается высушиванием листьев и повреждением коробочек хлопчатника, снижением урожая, ухудшением качества волокна, ожогами молодых побегов [1, 2–7]. В связи с вышеуказанным очевидна актуальность исследования по снижению «жесткости» действия и повышению эффективности хлоратсодержащих и роданистых дефолиантов. Повышение дефолиирующей активности и улучшение качества действия хлоратов достигается подбором эффективных синергетических добавок к препаратам и применением смесей.

Данные по растворимости компонентов в системе хлорат магния-роданид аммония-вода в литературе отсутствуют. Для характеристики поведения исходных компонентов в политермических условиях данная система изучена от (–52,6 °С) до 50 °С [8, 9]. Двойные системы, составляющие данную, систему хорошо освещены в литературе [10] и согласуются с нашими результатами. Система хлорат магния–роданид аммония–вода исследована шестью внутренними разрезами: из них I со стороны NH_4SCN-H_2O к полюсу $Mg(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$, а II-VI со стороны $Mg(ClO_3)_2$-H_2O к вершине NH_4SCN (рис. 1).

На основе политерм растворимости бинарных систем и внутренних разрезов построена политермическая диаграмма растворимости системы $Mg(ClO_3)_2$- NH_4SCN-H_2O от температуры полного замерзания от (–52,6 °С) до 50 °С, на которой разграничены поля кристаллизации льда, шестнадцати-, двенадцати-, шестиводного хлоратов магния, роданида аммония и хлората аммония. Установлены четыре тройных узловых точек системы, отвечающие совместной кристаллизации трех различных твердых фаз (табл. 1). На политермической диаграмме растворимости внутри полей кристалли-

зации нанесены изотермы через каждые 10 °С. Построены проекции политермических кривых на стороны хлорат магния–вода и роданид аммония–вода (см. рис. 1).

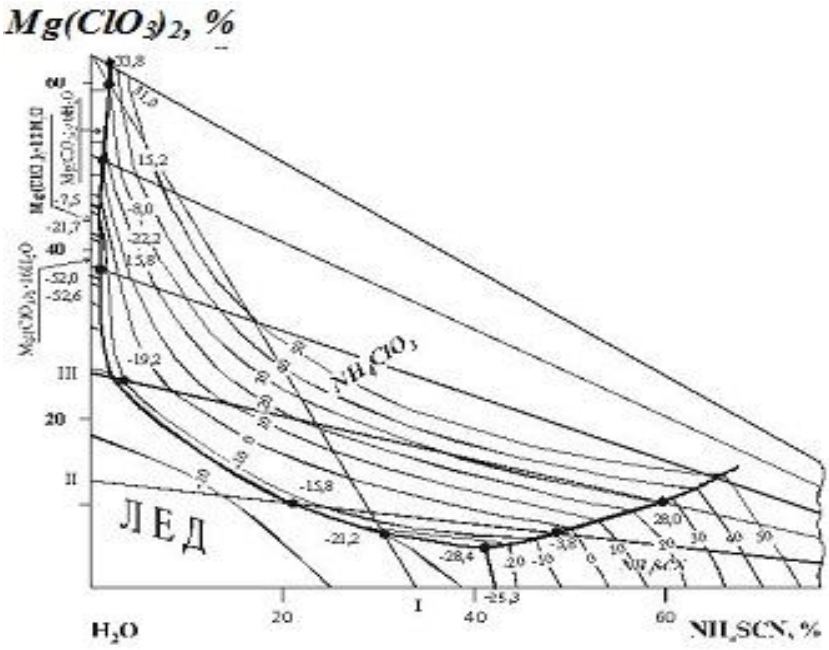


Рисунок 1 – Политермическая диаграмма растворимости системы хлорат магния–роданид аммония–вода

Таким образом, в изученной системе в качестве самостоятельной твердой фазы образуется хлорат аммония, образование которого наблюдалось также при исследовании системы хлорат натрия–роданид аммония–вода.

Образование хлората аммония в системе $Mg(ClO_3)_2$–NH_4SCN–H_2O можно предполагать следующим образом. Данная система является диагональным сечением четверной взаимной водной системы Mg^{2+}, $2NH_4^+$ // $2ClO_3^-$, $2SCN^-$ -H_2O в водной среде имеет место обменной реакции между хлоратом магния и роданидом аммония.

$$Mg(ClO_3)_2 - 2\ NH_4SCN \leftrightarrow 2NH_4ClO_3 + Mg(SCN)_2. \qquad (1)$$

В результате чего образуется хлорат аммония и роданид магния. Благодаря хорошей растворимости роданида магния в данной системе поле кристаллизации его в изученных температурных и концентрационных интервалах исходных компонентов не обнаруживается. Растворимость хлората аммония в данной системе невысокая по сравнению с другими компонентами. В этой связи он легко кристаллизуется в качестве самостоятельной твердой фазы и его поле кристаллизации занимает основную часть политермической диаграммы.

Таблица 1 – Двойные и тройные точки системы хлорат магния–роданид аммония–вода

Состав жидкой фазы, %			Тем. рак-рис., °С	Твердая фаза
$Mg(ClO_3)_2$	NH_4SCN	H_2O		
–	42,2	57,8	–25,3	Лед + NH_4SCN
4,8	41,0	54,2	–28,4	Лед + NH_4SCN + NH_4ClO_3
6,6	48,8	44,6	–3,8	NH_4SCN + NH_4ClO_3
10,4	59,6	30,0	28,0	
6,8	30,2	63,0	–21,2	Лед + NH_4ClO
10,4	20,6	69,0	–15,8	
24,8	1,9	73,3	–19,2	
36,5	0,9	62,6	–52,6	Лед+$Mg(ClO_3)_2 \cdot 16H_2O$+NH_4ClO_3
36,9	–	63,1	–52,0	Лед + $Mg(ClO_3)_2 \cdot 16H_2O$
37,8	1,0	61,2	–15,8	$Mg(ClO_3)_2 \cdot 16H_2O$ + NH_4ClO_3
41,6	0,9	57,5	–22,2	$Mg(ClO_3)_2 \cdot 16H_2O$ + $Mg(ClO_3)_2 \cdot 12H_2O$ + NH_4ClO_3
42,0	–	58,0	–21,7	$Mg(ClO_3)_2 \cdot 16H_2O$ + $Mg(ClO_3)_2 \cdot 12H_2O$
44,9	0,8	54,3	–8,0	$Mg(ClO_3)_2 \cdot 12H_2O$+ $Mg(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$+NH_4ClO_3
45,4	–	54,6	–7,5	$Mg(ClO_3)_2 \cdot 12H_2O$+ $Mg(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$
50,8	1,2	48,0	15,2	$Mg(ClO_3)_2 \cdot 12H_2O$+NH_4ClO_3
59,6	1,9	38,5	31,0	$Mg(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$+NH_4ClO_3
62,0	2,0	36,0	93,8	

Минимальная концентрация роданида аммония, вызывающая кристаллизацию хлората аммония в твердую фазу является 0,8%, а хлората магния 4,8%.

Хлорат аммония более активный, чем другие хлораты. Поэтому при совместном применении хлората магния с роданидом аммония ожидается повышение эффективности дефолиации.

Литература

1. Стонов Л.Д. Дефолианты и десиканты – М.: Химия, 1973. – 159 с.

2. Матвиенко О.Ф. Урожай и качество хлопка-сырца в зависимости от сроков сева, дефолиации и температуры воздуха: Автореф.: дис. канд. с.-х.наук. – Ташкент, 1986. – 18 с.

3. Рахматов Б. Сроки дефолиации высокоурожайного средневолокнистого хлопчатника в условиях Хорезмского Оазиса: Автореф. дис… канд. с.-х. наук. – Ташкент, 1986. – 22с.

4. Рахматов Б. Агротехника и урожайность хлопчатника // Тр. Союз НИХИ. – Ташкент, 1986. – 60 с.

5. Варунцяна И.С. Новые препараты для предуборочного обезлиствления хлопчатника. – М.: Гос-ное изд-во сельскохоз. литер.– 1957. – 96 с.

6. Чесалин Г.А. Сорные растения и борьба с ним. – М. Изд-во. «Колос», 1975. – 256 с.

7. Пекенью Перес Х., Ладонин В.Ф. Гербициды и их применение в умеренной и тропической зонах. – М.: Унив. друж. народ. им. Париса Лумумбы, 1974. – 240 с.

8. Растворимость в водных системах из хлоратов и роданидов натрия, магния и аммония / Д.Т. Кодирова, С.Р. Мирсалимова, Х. Кучаров, С. Тухтаев // Тез. докл. «Техника ва технологиянинг замонавий муаммолари» мавзусидаги еш олимларнинг республика Илмий-амалий конференциясининг материаллари. Фаргона политехника институти. – Фаргона, 2002. – С. 50.

9. Водные системы на основе хлоратов и роданидов натрия, магния и аммония / Д.Т. Кодирова, С.Р. Мирсалимова, Х. Кучаров, С. Тухтаев // Тез. докл. науч.-практ. конф. по актуальным вопросам химизации сельского хозяйства, 24-26 сентября, 2002 г.– Ташкент, 2002.– С.133.

10. Киргинцев А.Н., Трушникова Л. Н., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. – Л.: Химия, 1972. – 248 с.

Константинов В.М., Дашкевич В.Г., Судников М.А.
Белорусский национальный технический
университет, Минск, Беларусь

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО БОРИДНОГО СЛОЯ НА СТАЛИ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ МЕДНЕНИИ ОСНОВЫ

Химико-термическая обработка используется в различных отраслях машиностроения для повышения надежности и долговечности широкого ассортимента деталей машин и инструмента, позво-

ляет получать на поверхности изделия слой, отличающийся от сердцевины и обеспечивающий необходимый комплекс физических, химических и механических свойств.

В настоящее время накоплен огромный опыт по применению различных видов и способов ХТО. Тем не менее, получение специальных диффузионных слоев с особой морфологией слоя по-прежнему является актуальной задачей. В представленной работе исследовались особенности изменения морфологии термодиффузионного боридного слоя на стали в случае предварительного гальванического меднения, получения слоя меди толщиной 5–20 мкм.

Как известно, основное назначение борирования – повысить твердость и сопротивление изнашиванию деталей машин и инструмента. По данным ряда работ, для инструментальных сталей, например, проведение борирования повышает стойкость инструмента в 1,5–8 раз. Существенная проблема боридных слоев – повышенная хрупкость.

Процесс борирования может осуществляться различными способами, а свойства боридных слоев могут изменяться в широком диапазоне. В нашем случае борирование проводили в порошковых смесях при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором, по причине простоты и доступности такого способа насыщения. Режим обработки был выбран традиционный: температура 920 °С, время 4 ч.

Авторский опыт и известные положения ХТО позволяют выделить некоторые технологические приемы способные изменить структуру и морфологию диффузионного слоя:

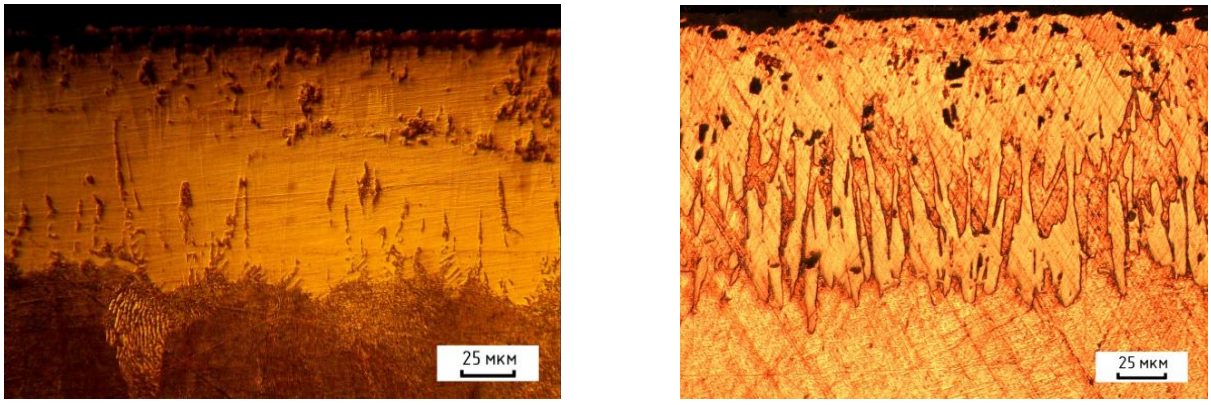
- предварительная обработка поверхности перед насыщением;
- управление температурно-временными параметрами и составом насыщающей среды;
- последующая после насыщения термическая и химико-термическая обработка.

В данной работе рассматривался вариант получения нетрадиционной морфологии слоя предварительной обработкой поверхности, в частности предварительным меднением. Основная цель такой обработки, создать условия, чтобы растущие боридные иглы распределялись по стальной матрице не сплошным слоем, а фрагментами. Получить такой слой можно разделив диффузионный поток путем создания пористого (разрыхленного) медного слоя, который будет являться своего рода мембраной, пропуская через

себя атомы бора только в местах пор. В результате получаемая боридная фаза будет чередоваться с мягкой ферритной, перлитной или феррито-перлитной матрицей.

Одним из важнейших критериев имеющих решающее значение для эффективного применения на производстве является хрупкость полученных термодиффузионных боридных слоев. Очевидно, что получаемое строение диффузионного слоя будет способствовать снижению хрупкости и склонности к скалываю диффузионного слоя при высоких контактных давлениях.

На рис. 1 продемонстрирован вариант однофазного боридного слоя полученный при традиционных условиях насыщения (*а*) и вариант боридного слоя полученный после предварительного меднения (*б*).



а *б*

Рисунок 1 – Микроструктуры термодиффузионных однофазных боридных слоев: *а* – традиционный слой; *б* – диффузионный слой, полученный после предварительного меднения

При предварительном меднении и выбранных режимах насыщения сформировался диффузионный слой с двумя характерными зонами. На рис. 1, *б* верхний участок слоя сплошной, в нижней части сохранилась раздробленность боридных игл. Раздробленность и образование двух зон свидетельствует не только об происходившем разделении диффузионного потока, но также и о существовании периода «работы» медного слоя, который в результате термодиффузионной обработки постепенно разрушался переходя в диффузионный слой и в переходную зону.

Отметим, что полученная нетрадиционная структура слоя, кроме снижения хрупкости может способствовать, например, улучшению антифрикционных свойств диффузионного слоя. Известно, что растворимость меди в железе и боре при комнатной темпера-

туре ничтожна мала, большая часть меди при формировании слоя должна распределяться собственными включениями в структуре. Проведенными экспериментами подтверждается наличие меди в структуре в виде обособленных дисперсных включений округлой и продолговатой формы с размерами порядка 1–10 мкм. Такая структура достаточна перспективна для деталей работающих в парах трения, в этом случае включения меди могут частично выполнять роль смазки.

Копылов В.И. НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА РАССЕЯНИЕ ЭНЕРГИИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В ПЛАЗМЕННЫХ МНОГОФАЗНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Структура оптимального композиционного плазменного покрытия определяется наличием в его составе элементов с определенной формой, размерами и микроструктурой, способствующих торможению разрушения в условиях деформирования. Эти вопросы связаны с механическими испытаниями, когда определяются пределы макроскопической текучести, прочности и другие характеристики.

С физико-механическими исследованиями связаны исследования рассеяния энергии упругих колебаний. В этом случае используются данные по внутреннему трению (ВТ) в виде зависимостей декремента колебаний от температуры и амплитуды деформаций. По зависимостям поглощения энергии упругих колебаний от деформации могут быть определены предел микроскопической деформации и микроскопический предел упругости.

Целью работы был анализ структурных особенностей и влияние их на макро- и микросвойства сформированных плазменных многофазовых покрытий.

Применялись армко – железо в качестве основы и одно- и многокомпонентные порошки для покрытий. Исследовались также покрытия в виде композиционных систем на основе нанопорошков диоксида кремния SiO_2 (аэросил), алюмоаэросила и титанаэросила ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$, $TiO_2 \cdot SiO_2$).

В качестве элементов структуры материала с дисперсными включениями и параметров их пространственного распределения, согласно подходам Гензамера – Мовчана, выступают – средний размер зерна D, средний диаметр сферических частиц d и объемная доля частиц второй фазы f, среднее свободное расстояние между частицами дисперсной фазы Δ, среднее расстояние между ближайшими частицами этой фазы λ.

Расстояния между частицами определяются с помощью соотношений:

$$\Lambda = \lambda\left(\frac{2}{3f}\right)^{1/2}, \qquad \lambda = \left(\frac{2}{3f}\right)^{1/2} d\left(1-f\right) \tag{1}$$

Зависимость механических характеристик поликристаллического композиционного материала (КМ) описывается видоизмененным соотношением Холла – Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + m\Delta_c^{-1/2}, \tag{2}$$

где σ_0, m – постоянные величины для данного материала матрицы.

Величина параметра структуры (Δ_C) в выражении (2) соответствует значениям $D \approx \Lambda \approx \lambda$ (1) в степени (-1/2). Кроме того, этот параметр включает в себя модуль сдвига G и вектор Бюргерса b матрицы с размером зерна D, а также зависит от величины дислокационной структуры L, а для покрытий от толщины h.

Анализ дислокационной структуры КМ, которая описывается размерно-структурными условиями (1), проводится по результатам измерений декремента колебаний δ (внутреннего трения Q^{-1}). Затухание энергии упругих колебаний δ определяется зависимостью от величины деформации кручения (амплитуды) γ в виде $\delta = c_1/\gamma\exp(-c_1/\gamma)$ с дальнейшей перестройкой в логарифмические координаты:

$$\ln(\delta\gamma) = \ln C_1 - \frac{C_2}{\gamma} \tag{3}$$

Зависимость (3) выражается прямой, наклон которой C_2 является мерой концентрации примесных атомов в зонах Котрелла, закрепляющих дислокации, а величина C_1 характеризует плотность этих дислокаций.

Константа C_2 в ур. 3 зависит от размеров сегментов дислокационной линии L_c:

$$C_2 = k\eta a / L_c, \tag{4}$$

В уравнении (4) k – коэффициент; a – параметр решетки; η – разница атомных радиусов металла-растворителя и примеси.

Необратимым процессам в микрообластях соответствуют определенный микроскопический предел упругости E (G), предел критической деформации $\gamma''_{кр}$ и максимальное (критическое) напряжение $\tau_{кр2}$. Критическое напряжение сдвига связано с деформацией сдвига через модуль сдвига соотношением $\tau_{кр} = G \cdot \gamma''_{кр}$. Начальное напряжение течения $\tau_{кр2}$ в сплаве, содержащего достаточное количество дисперсной фазы, определяется зависимостью $\tau_{кр2} = Gb/L_N$.

Зная величину $\gamma''_{кр}$, определяем длину дислокационного отрезка L_N:

$$L_N = \frac{b}{\gamma''_{кр}} = \frac{bG}{\tau_{кр2}} \qquad (5)$$

В таблице представлены экспериментальные и расчетные параметры структуры для ряда исследуемых покрытий.

Нанесение простых покрытий (номера 2–7, табл. 1) приводит к уменьшению предела критической микроскопической деформации $\gamma''_{кр}$. В то же время наличие дисперсных фаз в виде наносоставляющих (номера 12–16) приводит к противоположному результату. Эффект особенно проявляется для диффузионных покрытий (номера 8–11, на примере Mo).

Плазменные покрытия, как показали исследования, независимо от состава не оказывают заметного влияния на L_c в глубинных слоях, однако изменяют дислокационную структуру приповерхностных слоев, что обусловлено отличием в уровне напряжений, которые возникают на границе раздела основа-покрытие. Наличие дисперсных частиц в матрице металла вызывает заметное изменение размера дислокационной линии L_N. Дополнительная термодиффузионная обработка приводит в основном к уменьшению элементов дислокационной линии L_c и L_N. Дисперсные частицы в матрице в значительной степени задерживают развитие процессов, приводящих к разупрочнению. Не исключена возможность снижения $\gamma''_{кр}$ за счет возникновения при соответствующих (больших) деформациях нарушения сплошности на границе раздела «матрица–частица». В исследуемых композициях значительное разупрочнение в микрооб-

ластях покрытия сопровождается понижением микроскопического предела упругости, и, наоборот, в случае упрочнения.

Таблица 1 – Параметры дислокационной структуры исследуемых плазменных покрытий

№ п/п	Композиция	Параметры		
		$\gamma''_{кр}$, 10^{-4}	L_N, 10^{-4} см	L_C, 10^{-4} см
1	Fe – основа	2,3-7,5	1,08	0,59
	Покрытия простые			
2	Mo	1-2	2,5	1,3
3	Ti	1,8	1,1	0,6
4	NiAl	1,9-3,2	1,38	0,39
5	NiAl+Ti	1,7	1,77	0,36
6	NiCr	2,9	2,06	0,7
7	NiNb	5	0,5	0,165
	Покрытия после отжига			
8	Mo (2 ч., 1023 Т, К)	63	5,2	0,65
9	Mo (2 ч., 1273 Т, К)	100	2,2	0,53
10	Mo (2 ч., 1373 Т, К)	140	1,6	0,47
11	Mo (3 ч., 1373 Т, К)	160	1,4	0,43
	Покрытия с наносотавляющими			
12	NiAl+AlAL	5	0,5	0,034
13	Ni-B-Nb-SiO_2	5	0,5	0,022
14	ПГ10+AlAL	5,75	0,43	0,03
15	ПГ12+TiAL	9,4	0,26	0,022
16	ПГ12+Mo+TiAL	7,9	0,31	0,064

В пунктах (14-16) таблицы условные обозначения ПГ10 и ПГ12 относятся к порошкам ПГ–10Н–01 и ПГ–12Н–01.

Экспериментальные результаты, согласно уравнению (3), могут быть использованы для расчетов параметров микроструктуры (1) и поставлены в соответствие с макросвойствами (2).

Корзун А.Е., Волотовский Ф.А. ОАО
«ОКБ Академическое» НАН Беларуси,
Пынькин А.М., Насыбулин А.Х.
ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси,
Гайко В.А., Позылова Н.М., Хейфец М.Л.
Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ведущая роль в обеспечении интенсивного развития промышленности принадлежит машиностроению, которое призвано обеспечить радикальные изменения в технологии и организации производства, направленные на повышение его эффективности, снижение трудовых, материальных и энергозатрат. Особое место в этом процессе отводится станкоинструментальной промышленности, формирующей парк основного производственного оборудования машиностроительного комплекса, позволяющего на базе современных технологий повысить конкурентоспособность продукции.

Под технологией формообразования понимается совокупность метода обработки и реализующего его оборудования. Ведущее место в машиностроении занимает обработка резанием, к которой относят механические и физико-технические комбинированные способы удаления материала заготовки с использованием различных источников энергии и инструментов. Среди методов обработки резанием наиболее распространена механическая обработка, так как, несмотря на существенные отходы материала в виде стружки, в большинстве случаев она, обладая свойством управляемости и обеспечивая гибкость производства, является наиболее экономичным средством получения изделий требуемого качества, особенно в мелкосерийном производстве. Вместе с тем, все более широко в машиностроении применяются немеханические методы обработки резанием, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, например, плазменная, лазерная, электроннолучевая, гидроабразивная резка как металлических, так и неметаллических материалов. Высокоэффективны при резании труднообрабатываемых материалов комбинированные методы обработки, сочетающие традиционное резание и воздействие на материал заготовки концентрированными потоками энергии для улучшения его обрабатываемости.

Поскольку формообразующая обработка резанием является основным процессом изготовления деталей в современном машиностроении, повышение ее производительности и точности, снижение затрат энергии имеет огромное практическое значение. Особенно актуальна эта проблема применительно к изделиям сложной формы, изготовление которых характеризуется высокой трудоемкостью и часто связано с использованием специальных инструментов и оборудования.

Различная серийность производства в структурных подразделениях предприятия, частый переход к новым изделиям в условиях широкой номенклатуры продукции как единичного, так и массового производства, требуют создания на предприятии новых, рациональных взаимосвязей и ведут к унификации и регламентации объектов и процессов производства. Поэтому необходимо формирование новых подходов к подготовке производства, позволяющих разработать организационную структуру технологических комплексов предприятия, в рамках которой при изменении условий производства образуются новые рациональные взаимосвязи структур комплекса и оптимизируется их количество.

Применительно к рассматриваемым проблемам актуально изучение вопросов, определяющих уровень проектных решений: системный анализ технологии формообразования; оценка влияния параметров схем генерации поверхностей на эффективность процессов формообразования; разработка путей оптимизации структуры и механики формообразующей системы станочного оборудования; обоснование компоновки оборудования и проектирование инструментальных систем технологических комплексов.

Существенная роль в обеспечении эффективности создаваемых объектов принадлежит ранней стадии их разработки – функциональному проектированию. Применительно к технологиям формообразования оно связано, в первую очередь, с анализом и синтезом схем и методов обработки, а также структуры реализующих их обрабатывающих систем, что относится к основным задачам концептуального и схемотехнического уровней функционального проектирования технологических комплексов.

Комплексное решение этих задач важно для разработки теоретических и технологических основ синтеза рациональных способов формообразования поверхностей резанием и средств их реализации, обеспечивающих интенсификацию процессов обработки.

Функциональное проектирование, обуславливающее технико-экономический уровень создаваемого оборудования, включает этапы: синтеза схем формообразования, общих и кинематических схем обработки поверхностей, как основы проектирования кинематических схем обработки и кинематики оборудования; а также синтеза структуры формообразующих систем во взаимосвязи с компоновочным проектированием технологического комплекса. Данные этапы объединены общей целью – создание эффективных технологии формообразования изделий машиностроения механическими и физико-техническими методами.

Выбор рациональной общей схемы обработки производится путем сравнения возможных схем и выбора из них эффективной при проектировании оборудования.

Важность синтеза рациональной кинематики формообразования при проектировании оборудования обусловлена тем, что она, как основа кинематической схемы обработки, в значительной степени влияет на сложность его кинематики, производительность и универсальность. К основным принципам синтеза кинематики формообразования относятся:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка (за счет исключения геометрическим или кинематическим методами реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными);
- совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- введение движений для стабилизации условий резания, управления точностью формообразования, схемой или условиями резания;
- задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений;
- рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами станка для повышения его универсальности.

Принципы построения общих схем обработки и кинематики формообразования составляют основу синтеза кинематических схем обработки поверхностей.

Управление формообразованием возможно геометрическими, кинематическими, цикловыми и комбинированными методами, возможность реализации которых обеспечивается на стадии функцио-

нального проектирования технологического оборудования. Эффективность методов управления формообразованием обеспечивается:

- трансформацией характеристического образа, изменением ориентации инструмента относительно направления исполнительного движения и др.;
- сообщением дополнительных перемещений инструменту или его элементам;
- совмещением процессов частичного и полного формообразования и многократным профилированием;
- управлением совмещенными исполнительными движениями процесса резания и формообразования;
- заданием рационального сочетания скоростей элементарных движений и др.

Заключительный этап функционального проектирования связан с синтезом кинематики оборудования, которая обеспечивает реализацию принятых методов формообразования и является основой его кинематической схемы и компоновки. Предложенный модульный принцип построения кинематической структуры соответствует модульному построению технологических комплексов.

Кравчук Л.В., Буйских К.П., Задворный Е.А., Киселевская С.Г., Феофентов Н.Н. Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛА И ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Актуальность представленных в работе подходов обусловлена тем, что одним из наиболее эффективных и обосновано безопасных путей продления ресурса энергетического оборудования, которое исчерпало свой ресурс или находится на стадии его исчерпания, является создание экспериментальных и расчетных методов, позволяющих оценить кинетику реального повреждения материала элементов конструкции в процессе эксплуатации.

Эти методы должны включать в себя: методы исследования механизмов повреждения поверхностного слоя материалов экстремально нагруженных элементов конструкций; методы расчета термонапряженно-деформированного состояния (ТНДС) поврежденных в результате эксплуатации элементов конструкций и нахождение взаимосвязи между ТНДС и поврежденными поверхностными слоями; методы определения физико-механических характеристик этих поврежденных материалов; методы восстановления поврежденных поверхностных слоев; метод определения работоспособности, ремонтопригодности и прогнозирования ресурса.

Различные механизмы повреждения деградированных поверхностных слоев (ДС) материалов отрабатывались на элементах конструкций, представляющих собой модели сопловых лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов, после эксплуатационной наработки. Микроструктурные исследования ДС, в том числе с учетом образовавшихся трещин термической усталости, проводили с помощью светового микроскопа. Элементный состав ДС определяли на сканирующих электронных микроскопах. Микро- и макротвердость материала модели лопатки исследовали как в различных участках ДС на удалении от трещин термической усталости, так и по берегам трещин в различных зонах, отличающихся разной степенью влияния высокотемпературного агрессивного газового потока. В качестве критерия оценки необратимых изменений в поверхностных слоях была принята глубина деградированного слоя и интенсивность изменений его элементного состава. В результате исследований было установлены существенные изменения структуры и состава поверхностного слоя в том числе в зонах появления трещин термической усталости, а также по берегам трещин в процессе их роста.

Методика расчетной оценки ТНДС, базирующаяся на экспериментальных данных о кинетике теплового состояния моделей лопаток ГТД и физических исследованиях кинетики структурного состояния материала, обеспечила возможность проведения масштабных численных исследований с учетом значимости деградированных слоев и образовавшихся трещин термической усталости. Результаты исследования теплового и напряженно-деформированного состояния моделей лопаток ГТД с поврежденным поверхностным слоем показали, что величины напряжений, вызванные образованием деградированного слоя, вносят существенный вклад в напряженное состояние и должны учитываться при проведении расчетов, связанных с определением прочности

и долговечности элементов конструкций при оценке их остаточного ресурса. Проведенные расчеты указали на необходимость таких важных задач, как получение корректных данных о свойствах материала деградированного слоя и совершенствованию методологических подходов, связанных с определением реальных полей остаточных напряжений в элементе конструкции, обусловленных отличиями свойств ДС и основного материала, а также эксплуатационными и технологическими факторами.

Основные принципы прогнозирования остаточного ресурса материала конструкционных элементов энергетического оборудования предполагают не только знания на определенных стадиях эксплуатации изменений структуры и свойств материала, наличие методов их учета при определении напряженно-деформированного и предельного состояния конструкции. Также особо значимым при этом является разработка методологических возможностей для оптимального выбора различных восстановительных и ремонтных технологий и получения базовой информации, необходимой для оценки ресурса после их реализации. Поэтому решение вопросов о необходимости использования тех или иных ремонтно-восстановительных технологий для конструкций энергетического оборудования всегда увязывается с исследованием различных стадий процессов повреждения.

Используя разработанную методику, получены результаты исследования влияния технологии ремонта на характеристики статической кратковременной и длительной прочности материала моделей лопаток ГТД, которые свидетельствуют о том, что в случае оптимального подбора ремонтной технологии характеристики прочности и пластичности отремонтированного материала могут быть близки к исходным. Основываясь на критериях сопротивления действию предельных силовых нагрузок можно констатировать, что ремонтная зона модели лопатки не является слабым звеном, а деформационные характеристики материала после оптимально выбранного ремонта могут быть достаточно высоки и в целом быть не хуже служебных свойств неповрежденного материала.

Основываясь на разработанных оригинальных методиках, а также на анализе литературных данных и нормативных документах была разработана схема поэтапного выбора ремонтной технологии, обеспечивающей высокий уровень надежности продлеваемого ресурса конструкционных элементов энергетических машин.

Кривощеков В.Е. Учебно-исследовательский
центр «Надежность в судоходстве», Одесса, Украина

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА: ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ОЦЕНКА ПРОБЛЕМЫ

Научная парадигма рециклинга в технике и практическая реализация ее отдельных элементов в различных отраслях промышленности экономически развитых стран Запада и Востока за последние 15–20 лет уже определили современный тренд дальнейшего мирового научно-технического прогресса. Основой этому послужило, конечно, осознание, в первую очередь, ограниченности всех видов ресурсов/энергии на планете Земля и стремление мирового Разума к качеству и совершенству [1, 2]. Идеи рециклинга в науке и технике стимулируют постоянные изменения технологий машиностроения, при которых изготовители/проектировщики новых машин/приборов и ремонтные предприятия по восстановлению/реновации их эксплуатационных свойств за период их жизненного цикла, сливаются, объединяются в единый комплекс для достижения общих целей, важнейшей из которых является сохранение и преумножение эффективности и результативности промышленного производства вообще…. Духовные и общечеловеческие ценности этого глобального процесса пока оставим за скобками настоящего доклада.

Далее в докладе рассматриваются исторические аспекты зарождения, развития, становления и «смерти» проблемы восстановления/реновации изношенных деталей (ВИД) судовых технических средств (СТС) различных видов на морском флоте бывшего СССР и теперешней, уже независимой более четверти века Украины. Показано, что с 80-х годов прошлого столетия многие отрасли промышленности на 70 и более процентов насыщенные импортными машинами и оборудованием начали испытывать дефицит в запасных частях (ЗЧ) к ним и валютную недостаточность для их закупки за рубежом. Во многих министерствах бывшего СССР были разработаны и профинансированы научно-технические программы по замещению закупок импортируемых ЗЧ методами ВИД на отечественных предприятиях. Аналогичная программа и даже отраслевая лаборатория в те годы были созданы Министерством морского флота СССР на базе Одесского высшего инженерного морского училища

им. Ленинского комсомола. Потрачены миллионы бюджетных рублей, написаны десятки диссертаций, получены государственные премии и медали ВДНХ СССР…, а в итоге – фактически эффективная система обеспечения торгового флота качественными запасными частями взамен закупки фирменных так и не была создана. Затем – развал СССР, исчезновение судов и пароходств, крах судостроительной и судоремонтных секторов экономики в Украине [3–4]. Далее будет….

Литература

1. Кривощеков В.Е. Рециклинг торговых судов в мировой судоходной индустрии // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – № 8. – 2008. – С. 2–3.

2. Кривощеков В.Е. Рециклинг морских судов в мире и в Украине // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 01–05 июня 2015 г. Одесса-Киев: АТМ Украины, 2015.- С. 89-93.

3. Кривощеков В.Е. Обеспечение судов восстановленными запасными частями: опыт системного анализа (Морской транспорт. Серия «Техническая эксплуатация флота»): Экспресс-информ. – Вып. № 9(839)–№10(840) – М.: Мортехинформреклама, 1995. – С. 1–11.

4. Кривощеков В.Е. Второй и Третий сборники научных трудов по менеджменту качества // http://krivoshchekov.at.ua.

Крючков Ю.Н. Гжельский государственный университет,
Московская обл., пос. Электроизолятор, Россия

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Структурой дисперсных систем и величиной межчастичных контактов в значительной степени определяются свойства образуемых покрытий. Моделирование структуры таких систем облегчает оптимизацию их свойств [1–3].

Для описания структуры композиционных и проницаемых монодисперсных систем используем средний размер D составляющих систему частиц, пористость П (или объемное содержание связки в ком-

позите), объемное содержание дисперсной фазы (V = 1–П) и размер d межчастичных контактов. По ним определяем недостающие параметры [3]: среднее координационное число Z, удельную поверхность S_o, средний радиус r, количество N и контактную площадь S_{oc} межчастичных контактов в единичной площади. В единице площади моделируемого материала содержатся $n = 4V/(\pi D^3)$ частиц. Для наглядности считаем частицы цилиндрическими с высотой D, а контакты между ними квадратного сечения. В результате имеем:

$$1 - П = \pi/[Z(1 - 2h_2/D)^2 \operatorname{tg}(\pi/Z)], \quad (1)$$

$$S_o = 4(1 - П)\{1 - (Z/\pi)[\arcsin(d/D) - 2(h_o - h)/D]\}/D, \quad (2)$$

$$S_{oc} = 2Z(1 - П)^2/(\pi D^3), \quad (3)$$

где $h = h_o - 0{,}25D^2 \cdot [\arcsin(d/D) + (d/D)(1 - 2h_o/D)]/d$; h – нормальная деформация частиц; $h_o = [D^2 - (D^2 - d^2)^{0,5}]/2$.

Структуру и свойства гетерогенных покрытий определяет критическое координационное число порошковой системы Z_{cr} (среднее минимальное число контактов у частицы при образовании связной системы). Оно позволяет оценивать качество структуры порошковых материалов и служит опорной точкой при оценке физических характеристик материалов с разной пористостью.

В табл. 1 приведены перколяционные параметры регулярных двухмерных систем из работ [2, 3]. Из анализа таблицы можно сделать вывод, что образование бесконечного (связанного или проводящего) кластера из какого-либо компонента в них определяется только долей объема системы приходящегося на этот компонент V_{cr} = 0,55 или соответствующим значением Z_{cr} = 2,86 [3].

Таблица 1 – Зависимость критической пористости $П_{cr}$ от типа решетки при d/D=0

П,	Z	C_{cr}	$П_{cr}$, %	$П_{cr}$, %	$Z_{cr}(П_{cr})$ по (1)
0,0931	6	0,50	46,50		
0,215	4	0,59	46,34	45,07	2,83
0,395	3	0,70	42,32		

Качество получаемых покрытий (износостойкость, термостойкость, прочностные, электрические и др. характеристики) определяется однородностью структуры и соотношением между однофазными и межфазными контактами.

При обычном подходе к монодисперсным двухфазным композициям, соотношение между одно- и межфазными контактами в определяется только объемной концентрацией C одного из компонентов:

$$N_{of1}/N_\Sigma = C^2,$$
$$N_{of2}/N_\Sigma = (1-C)^2, \quad (4)$$
$$N_{mf}/N_\Sigma = 2C(1-C),$$

где $N_{of(mf)}/N_\Sigma$ – доля одно- и межфазных контактов в системе.

Выражение (4) не учитывает перколяционный характер гетерогеннх систем.

По теории перколяции на однофазные и межфазные контакты частиц в пересчете на одну частицу приходится – $N_{of1}/n = 0{,}5 \cdot 2{,}86 C_{cr}$ $N_{mf}/n = (Z - 2{,}86/Z)C_{cr}$. и $N_{of2}/n = [Z(1 - C_{cr}) - (Z - 2{,}86)C_{cr}]/2$ контактов. Сумма одно- и двухфазных контактов, приходящихся на одну частицу, равна $0{,}5Z$. Число частиц в единице объема n и число контактов в этом объеме N связаны соотношением $n = 2N_\Sigma/Z$.

Соответствующие критические доли контактов составят:

$$N_{of1,cr}/N_\Sigma = 2{,}86\ C_{cr}/Z\ , \quad (5)$$
$$N_{mf,cr}/N_\Sigma = 2(1 - 2{,}86/Z)C_{cr}, \quad (6)$$
$$N_{of2,cr}/N_\Sigma = (1 - C_{cr}) - (1 - 2{,}86/Z)C_{cr} = 1 - (N_{of1,cr} - N_{mf,cr})/N_\Sigma. \quad (7)$$

По выражениям (5)–(7) и известным критическим концентрациям первого компонента из табл. 1 рассчитываем значения $N_{of1,cr}$ и $N_{mf,cr}$ (см. табл. 2).

Из табл. 2 видно, что выражение (4) согласуется с выражениями (5)–(7) только при $Z = 2{,}86$. Так как доли однофазных и межфазных контактов зависят от критического координационного числа Z двухмерной системы, то расчет долей однофазных и межфазных контактов в порошковых бинарных смесях по выражениям (4) неточен.

Таблица 2 – Зависимость критической доли одно- и межфазных контактов в порошковой смеси от среднего координационного числа системы $Z = 4$

Z	C_{cr}	$N_{of1,cr}$ по (5)	$N_{of1,cr}$ по (4)	$N_{mf,cr}$ по (6)	$N_{mf,cr}$ по (4)	$N_{of2,cr}$ по (7)	$N_{of2,cr}$ по (4)
	0,50	0,238	0,250	0,523	0,50	0,238	0,250
4	0,59	0,422	0,348	0,336	0,484	0,242	0,168
3	0,70	0,667	0,490	0,065	0,420	0,267	0,090
2,86	1,00	1,000	1,000	0	0	0	0

Вывод. Значения $N_{of1,cr}$ и $N_{mf,cr}$, отвечающие экспериментальным данным и численным расчетам, определяются зависимостями (5)–(7) и поэтому зависят от пористости.

Литература

1. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. – М.: Химия, 1982.

2. Займан Дж. Модели беспорядка. – М.: Мир, 1982.

3. Крючков Ю. Н. Структура и свойства гетерогенных пористых композиционных материалов. – Verlag: LAP Lambert, Academic Pablishing, 2011.

Кузнецов С.Ю., Лёвушкина Н.В., Фатюхин Д.С.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

ПОВЫШЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКЛЁПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Не смотря на то, что заклепочные соединения постепенно уступают место сварным и клеевым, они остаются незаменимыми в ответственных местах конструкции, подверженных интенсивным переменным и вибрационным нагрузкам. Поэтому существует необходимость повышения герметичности и усталостного сопротивления таких соединений.

Заклепочные соединения воспринимают большие статические и переменные нагрузки, которые могут привести к преждевременному расшатыванию соединения и его разрушению. Повышение надежности соединения напрямую зависит от качества заполнения отверстия материалом заклепки.

При расклепывании сначала происходит заполнение отверстия вследствие увеличения диаметра заклепки, а затем - образование замыкающей головки. Для повышения сопротивления усталости необходимо создание больших радиальных натягов, вызывающих сжимающие напряжения в зоне отверстия и уменьшающих в зоне закладной головки основные растягивающие напряжения.

Диаметры отверстий под заклепки рекомендованы ГОСТ 14802-85. Поскольку установка заклепки в отверстие выполняется с зазором, особенно при больших значениях толщины пакета (толщина пакета в 2 раза больше диаметра заклепки), средняя часть отверстия остается ненагруженной, что может привести к нарушению герметичности соединения, зарождению фреттинг-коррозии и, как следствие, его разрушению.

Повысить равномерность распределения радиальных напряжений по толщине пакета позволяет уменьшение зазора между отверстием и заклепкой. Однако в этом случае возникает контактное трение между стержнем заклепки и стенкой отверстия, что осложняет установку заклепки и может приводить к деформации пакета.

Уменьшить трение в соединении позволяет наложение ультразвуковых колебаний на его элементы. Известны способы применения ультразвука для снижения трения при сборке и разборке резьбовых и соосных соединений деталей [1]. В рассматриваемом случае наиболее простым техническим решением является передача колебаний устанавливаемой заклепке.

Для определения влияния ультразвуковых колебаний на снижение коэффициента трения проведено экспериментальное исследование соосного соединения деталей типа вал-втулка с зазором 0,01 мм (рис. 1).

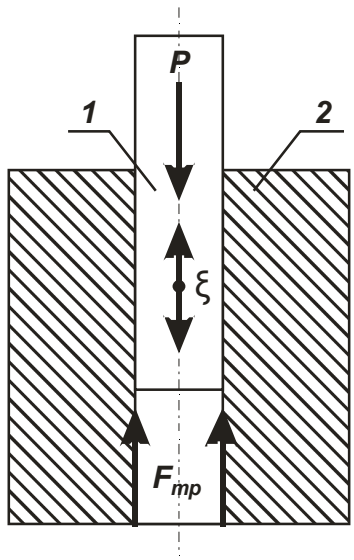


Рисунок 1 – Схема соединения вала (1) и втулки (2):
$F_{тр}$ – сила трения; P – сила статического давления; ξ – амплитуда колебаний

К валу прикладывалась сила статического давления P = 5Н, которая не обеспечивала процесс сборки. При подаче продольных колебаний с амплитудой $\xi > 3$ мкм вал свободно проходил во втулку. Аналогичные результаты наблюдались и в случаях установки заклепки в отверстие пакета деталей.

Наложение ультразвуковых колебаний на заклёпку при установке ее в отверстие пакета соединяемых деталей позволяет уменьшить величину радиального зазора без приложения значительных силовых нагрузок, что позволяет избежать деформации элементов заклепочного соединения и повысить величину радиальных напряжений в нем.

Литература

1. Применение ультразвука при сборочно-разборочных операциях / В.Ф. Казанцев, Б.А. Кудряшов, А.Н. Неверов и др. – М.: Техполиграфцентр, 2008. – 146 с.

Лавров А.С. ООО «ТМ.ВЕЛТЕК», Киев, Украина

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС КАК ВАЖНЕЙШИЙ ФАКТОР ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

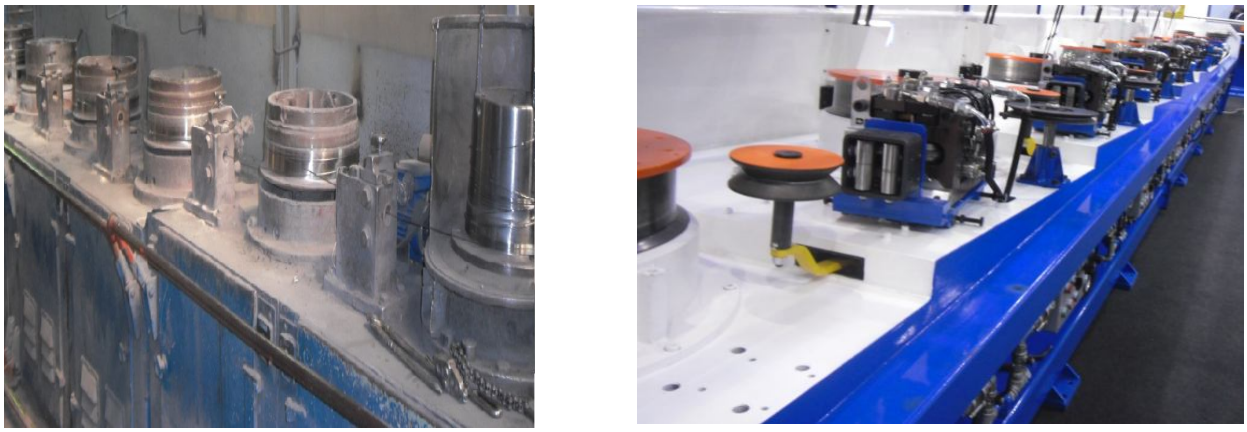
В наше время предприятия Украины несут большие убытки в связи со снижением объема продаж как на внутреннем рынке так и на рынках СНГ.

Вклад научно-технического прогресса в прирост валового внутреннего продукта наиболее развитых стран составляет (по различным оценкам) от 70 до 90%. В связи с этим для обеспечения стабильной работы предприятия необходима переориентация производства на выпуск продукции согласно стандартов Евросоюза (рис. 1).

Рисунок 1 – Направления развития НТП на предприятии

– На сегодняшний день на предприятии разработан план технического перевооружения (внедрение новой техники), который предусматривает постепенную установку нового высокоэффективного

современного волочильного оборудования, позволяющего повысить производительность, обеспечивая высокое стабильное качество порошковой проволоки согласно требованиям ЕС (рис. 2).



а *б*

Рисунок 2– Волочильное оборудование старого и нового образца:
а – производительность 0,6–1,5 т/смену; *б* –1,5–3,0 т/смену

– Повышение качества порошковой проволоки за счет улучшения ее чистоты: согласно наших исследований проволок различных производителей остаточное содержание волочильной смазки на поверхности проволок находится в пределах 0,100 кг/т до 0,900 кг/т на порошковых проволоках и от 0,050 кг/т до 0,600 кг/т на проволоках сплошного сечения. На рис. 3 приведены средние значения остаточной смазки у различных производителей проволок.

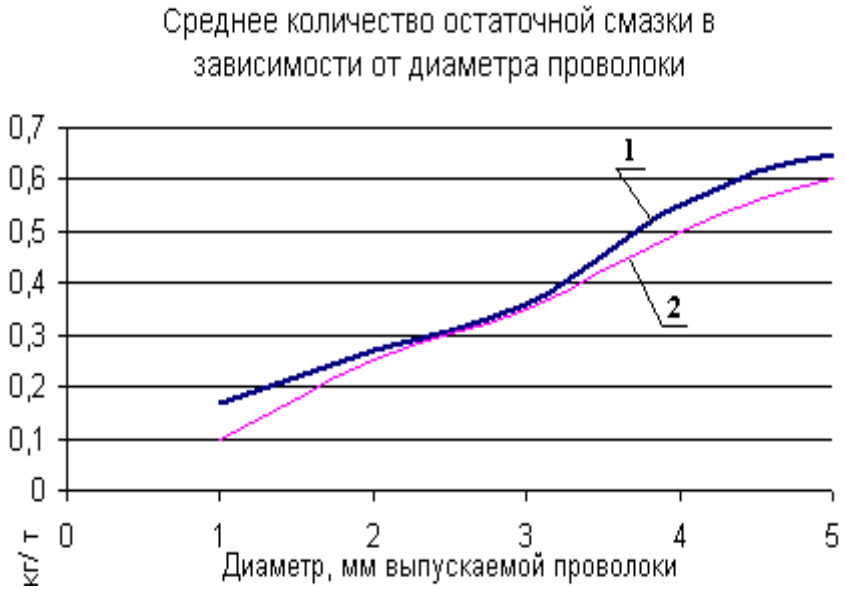


Рисунок 3 – Среднее остаточное содержание волочильной смазки на проволоке различных производителей.
1 – порошковые проволоки; 2 – проволоки сплошного сечения

Фирма ООО «ТМ. Велтек» уже много лет занимается исследованиями в данной области.

Таблица 1 – Среднее содержание остаточной волочильной смазки на поверхности проволоки

Производитель сварочной проволоки Ø1,2 мм	Среднее содержание остаточной волочильной смазки на поверхности, кг/т
ТМ. Велтек Украина п/п	0,16
Esab Tubrodur п/п	0,30
BÖHLER Seproz ES п/п	0,20
Sorex п/п	0,09
Lincoln Electric п/п	0,15
Стальканат Украина с/с	0,10
Польша с/с	0,15
Днепрометиз Украина с/с	0,25

– Внедрение нового намоточного оборудования, позволяющего рядно наматывать проволоку.

Рисунок 3 – Современное намоточное оборудование производительностью 1,0–2,5 т в смену

Выводы:

- внедрение достижений НТП на сегодняшний день является главным путем выживаемости предприятия и обеспечения экономического роста и конкурентоспособности предприятия в дальнейшем;
- снижение волочильной смазки на поверхности сварочных проволок есть ключевой задачей для повышения качества сварочных проволок.

Лавров С.Н., Лавров А.С., Чепиль В.В.
ООО «ТМ.ВЕЛТЕК», Киев, Украина

ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ РЕМОНТА ВАЛКОВ ЦЕНТРИФУГ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ

Важной задачей предприятий по производству тепловаты (минеральных плит – базальтовых полотен) является ремонт и повышение стойкости валков центрифуги (рис. 1).

Рисунок 1 – Фото базальтовой ваты и валков центрифуги после износа

Процесс изготовления волокон базальта представляет следующий технологический процесс: расплав базальта, содержащий кислые окислы в следующем количестве: SiO_2 = 45%; Al_2O_3 = 15%; Fe_2O_3 = 6-7% с дошихтовкой металлургическим шлаком подается на валки центрифуги, которые вращаются со скоростью от 3000 до 6000 об/мин.

В результате получают нитевидные волокна базальта, которые затем собирают и прессуют в плиты.

Валки работают при высоких температурах (расплавленный базальт попадает на 1–2 валок при температуре 1250–1470 °С) в сочетании с абразивным износом (рис. 2). Охлаждение валков выполняется водой, подаваемой внутрь валка.

Скоростной режим работы валков: 1-й валок – 3000 об/мин, 2-й – 4500–4800 об/мин, 3-й – 5600–6000 об/мин, 4-й – 5900–6000 об/мин.

Межремонтный период работы центрифуги: 24–120 ч (время на ремонт центрифуги 24–48 ч)

Межремонтный период работы валков:

1-й валок – до 200 ч, 2-й – 60–80 ч, 3-й – 24–48 ч, 4-й – 24–48 ч

Материал валков 30ГСА, твердость 200–300 НВ.

Специалистами нашего предприятия разработаны две марки порошковых проволок для восстановительной наплавки валков центрифуг (Велтек–Н215S, Велтек–Н225S) с легированием наплавляемого металла хромом, никелем и молибденом (рис. 3).

Рисунок 2 – Изношенные валки центрифуг

Рисунок 3 – Валки, наплавленные проволоками Велтек-Н215S, Велтек–Н225S

Таблица 1 – Результаты испытаний после восстановления валков

Номер валка	2	3	4
Стойкость нового валка, ч	60–80	24–48	24–48
Стойкость валка после восстановления ПП Велтек – Н215S, ч	105	62	62
Стойкость валка после восстановления ПП Велтек – Н225S, ч	105	73	73

Выводы:

1. Увеличен ресурс рабочей поверхности валков с 24–48 до 62–73 часов.

2. Повысилась стойкость нерабочей зоны поверхности валков против абразивного воздействия корольков (небольшие застывшие шарики металла с окисленной поверхностью).

Латипова М.И. Ферганский профколледж нефтегазовой промышленности
Домуладжанова Ш.И., Домуладжанов И.Х. Ферганский политехнический институт, Фергана, Узбекистан

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ – КАК НАУКА

Безопасность жизнедеятельности представляет собой систему научных знаний, изучающих природные и антропогенные опасности и позволяющих разрабатывать защиту от них [1, 2].

Здесь безопасность выступает как «цель» дисциплины «Безопасность жизнедеятельности». А «жизнедеятельность» – как «средство», обеспечивающее БЖД. Под безопасностью кого-либо или чего-либо понимается такое их состояние, при котором они находятся в положении надежной защищенности. Сам термин «жизнедеятельность» объединяет два понятия «жизнь» и «деятельность».

В соответствии с Конституцией Республики Узбекистан каждый человек и гражданин Узбекистана имеет право на жизнь с одновременным правом на достойный и достаточный уровень жизни. Из этого следует, что труд людей должен обеспечить «удовлетворительное существование для них самих и их семей», а также «достаточное питание, одежду и жилище, непрерывное улучшение условий жизни семьи».

Условия жизни по системе ЮНЕСКО слагаются из стоимости существования человека, которое и определяет стоимость рабочей силы. Стоимость рабочей силы выражается стоимостью жизненных средств, необходимых для того, чтобы произвести, развить и сохранить, увековечить рабочую силу. В эти средства входят пропитание семьи, образование, жилище, транспорт, одежда, информационная сфера, досуг.

Каждая эпоха относительно самостоятельно формирует средний уровень жизни человека.

Стоимость необходимых жизненных средств как раз и составляет стоимость рабочей силы. В каждой стране она, естественно, разная в зависимости от валового национального продукта (ВНП), но постоянным фактором является определенный процент отчислений от промышленной прибыли (а на прибыль влияют и состояние безопасности и условия труда (УТ) на зарплату, за амортизацию оборудования и помещение и государству на общественные нужды).

Существует минимальный уровень зарплаты в рамках ООН, ниже которого нельзя опускаться, чтобы не потерять человеческую сущность. Он ежегодно должен возрастать в зависимости от уровня роста мирового общественного продукта.

Деятельность присуща «гомоагенс» (греч. – деятельный), который свою деятельность или труд направляет на обеспечение своих потребностей, в том числе и культурных.

Под термином труд понимают целесообразность потребностей, в результате которых человек воздействует на природу и использует ее в целях создания предметов необходимых для своих потребностей. Для того чтобы выполнить условие, обеспечивающее его существование, человек должен трудиться независимо от существующих государственных формаций, а государство должно обеспечить правовую защиту его труда.

Согласно Конституции РУз. «Каждый имеет право на труд, который он свободно выбирает или на который свободно соглашается, а также право распоряжаться своими способностями к труду и выбирать профессию и род занятий».

Трудовая деятельность человека осуществляется в условиях определенной производственной среды, которая может оказывать неблагоприятное воздействие на работоспособность и здоровье человека, если параметры этой среды и опасных и вредных производственных факторов превышают допустимые значения.

Под термином здоровье понимают здоровье населения и индивида. В Уставе ВОЗ (1958 г.) определено: здоровье – это «состояние полного физического, духовного и социального благополучия, а не только отсутствие болезни или физических дефектов».

Научное изучение этого вопроса позволило значительно расширить понятие «здоровье», введя в это понятие как его составные части трудоспособность и активную жизнедеятельность.

В этой связи с целью создания здорового общества гигиеническое поведение граждан должно стать моральной категорией, а охрана здоровья – стабильной ценностной ориентацией личной жизни граждан.

В курсе «Безопасность жизнедеятельности» не случайно останавливаются на анализе понятий здоровья, так как безопасность жизнедеятельности человека и общества в целом не может быть обеспечена, если не обеспечивается здоровье гражданина страны. Отсюда следует, что здоровье должно стать объектом заботы и социальной политики любого цивилизованного государства. Это связано с тем, что на здоровье населения влияют следующие факторы:

- состояние ОС и ее качество,
- условия труда и быта,
- жилищные условия,
- уровень зарплаты,
- образовательный уровень,
- обеспеченность продуктами питания и соответствующей правдивой информацией,
- состояние медицинского обслуживания, в том числе, и профилактических осмотров,
- климатогеографические и другие социальные и гигиенические факторы,
- экологическая безопасность.

Большое значение в сохранении здоровья населения приобретает обеспечение безопасности жизнедеятельности.

Здоровье человека можно охарактеризовать функциональным состоянием его организма, обеспечивающим продолжительность жизни, физическую и умственную работоспособность, самочувствие, функцию воспроизводства здорового потомства и воспитание будущих поколений.

Показателем здоровья в первую очередь является количество здоровья, т.е. средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни (СОППЖ). Усредненный биологический видовой показатель (норматив) для человека европеоида определен в 89 (±) лет. Он обусловлен биологическими, характеристиками, т.е. его надежностью, заданной при рождении индивидуума.

Продолжительность жизни в различных странах во многом зависит не только от успехов медицины, но и от уровня социально-экономического развития общества, состояния и качества природ-

ной среды (ПС) и от стрессов, которые общество способно вкладывать в развитие безопасности жизнедеятельности.

Как всякая наука «Безопасность жизнедеятельности» имеет свою цель, задачи, предметы изучения, средства познания и принципы, используемые для решения практических и теоретических (научных) задач.

Цель «Безопасность жизнедеятельности» исходит из определения ее как науки, и она представляет собой, таким образом, достижение безопасности человека в среде обитания. Цель «Безопасность жизнедеятельности» хорошо иллюстрирует рис. 1.

Рисунок 1 – Цель и задачи безопасности жизнедеятельности

Объектом изучения «Безопасность жизнедеятельности» как науки является среда или условие обитания человека [1, 2].

Эту среду по генезису классифицируют как производственную и непроизводственную, которая в рассматриваемых условиях, при неблагоприятных сочетаниях определенных параметров оказывает воздействие, в том числе и отрицательное, на гомосферу.

Воздействие на организм человека факторов среды обитания частично компенсируется за счет адаптации организма к параметрам факторов, изменяемым в небольших пределах, и к их интенсивности и уровню воздействия. Адаптацию медицинские работники рассматривают как любое приспособление органа, функции или организма к изменяющимся условиям среды. Дальнейшее же нежелательное действие факторов устраняется компенсационной способностью организма.

Если же действие факторов превышает возможности организма, то новое состояние организма можно представить нососферой (от греч. nosos – болезнь).

Все элементы, составляющие среду обитания человека, и взаимоувязанные действия становятся факторами, влияющими на БЖД. Поэтому, изучая среду обитания, наука БЖД обязана рассматривать влияние этих факторов и их взаимодействий на человека, как в отдельности, так и в совокупности. Тем более что совокупность факторов среды и трудового процесса выражают УТ на рабочем месте (РМ).

Воздействие на организм человека факторов среды обитания частично компенсируется за счет адаптации организма к параметрам факторов, изменяемым в небольших пределах, и к их интенсивности и уровню воздействия. Адаптацию медицинские работники рассматривают как любое приспособление органа, функции или организма к изменяющимся условиям среды. Дальнейшее же нежелательное действие факторов устраняется компенсационной способностью организма.

Если же действие факторов превышает возможности организма, то новое состояние организма можно представить нососферой (от греч. nosos – болезнь).

Все элементы, составляющие среду обитания человека, и взаимоувязанные действия становятся факторами, влияющими на БЖД. Поэтому, изучая среду обитания, наука БЖД обязана рассматривать влияние этих факторов и их взаимодействий на человека, как в отдельности, так и в совокупности. Тем более что совокупность факторов среды и трудового процесса выражают УТ на рабочем месте (РМ).

Литература

1. Безопасность жизнедеятельности: Уч. для вузов / Под общ. ред. С. В. Белова. – М.: Высшая школа, 1999. – 448 с.

2. Попспирова Н.М., Домуладжанов И.Х. Безопасность в процессе производственной деятельности: Уч. пособие. – Ф.: Ферган-Техника, 2003. – 205 с.

Лебедев В.Г., Клименко Н.Н. Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ШЛИФОВАНИЯ

Для повышения ресурса деталей, работающих в тяжелых условиях, необходимо, чтобы рабочие поверхности этих деталей обладали комплексом необходимых свойств. Повышение требований к точности деталей машин, применение новых труднообрабатываемых материалов, остро поставлен вопрос об эффективной чистовой обработке заготовок, придающей им окончательную точность и необходимый комплекс физико-механических характеристик. Одним из видов такой обработки, и часто единственно возможным, является шлифование.

Температура, возникающая в зоне контакта шлифовального круга с деталью, может иметь максимальные значения, доходящие до 1200–1300 °С, что вызывает шлифовочные дефекты – глубокие изменения фазово-структурного состава поверхностного слоя, что создает благоприятные условия для образования остаточных напряжений и как следствие трещин [1]. Как известно из литературы [2], тепловые шлифовочные дефекты снижают долговечность детали в 3–4 раза. В настоящее время, в связи появлением новых многочисленных сталей и сплавов, которые обрабатываются шлифованием, весьма актуален вопрос создания нормативной базы режимов обработки, которые, наряду с достаточной производительностью, обеспечивают высокое качество поверхностного слоя.

Громадное количество деталей, поверхности которых подвергаются наплавке при изготовлении и при ремонте это тела вращения. Естественно после наплавки, которая обеспечивает точность порядка h9, имеются погрешности геометрической формы деталей, которые укладываются в поля допусков. При наплавке коротких цилиндрических поверхностей, таких как шейки коленвалов, распредвалов, шейки валов газовых турбин практически всегда имеется погрешность формы – некруглость, которая проявляется в виде овальности. Шейки валов шлифуются методом врезания с определенной величиной радиальной подачи круга. При этом из-за овальности происходят периодические колебания мгновенной глубины резания, что вызывает периодические изменения величины кон-

тактной температуры шлифования, в результате чего могут возникать тепловые дефекты поверхностного слоя – такие как фазовые и структурные превращения, которые резко снижают работоспособность поверхностного слоя.

Наиболее рациональный выход из положения это автоматическое поддержание контактной температуры шлифования на безопасном уровне. Это может быть выполнено за счет компенсации колебаний глубины резания другими составляющими режимов обработки.

Целью настоящей работы является создание имитационной математической модели процесса автоматического управления контактной температурой шлифования наплавленных поверхностей.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать объект управления,
- выбрать управляемую величину,
- выбрать законы управления,
- разработать алгоритм и блок схему процесса управления.

Эта задача может быть выполнена с помощью аналитического анализа процесса теплообразования при шлифовании, рассматривая процесс резания абразивным зерном с его противоречивыми закономерностями [4].

Алгоритм и блок-схема расчетов (рис. 1) создана на базе алгоритма и блок-схемы работы [4] по определению контактной температуры шлифования.

Следует отметить, что при автоматическом управлении температурой шлифования, при выборе скорости круга в качестве управляемой величины, в начальный период съема припуска наблюдается увеличение шероховатости шлифуемой поверхности из-за уменьшения скорости вращения круга. Однако после удаления примерно половины припуска скорость вращения круга возвращается к исходной величине, вследствие исправления формы шлифуемой детали. В результате этого шероховатость поверхности достигает своего заданного значения.

***Выводы**:*

1. Разработанная имитационная модель автоматического управления процессом шлифования доказывает принципиальную возможность реализации этого процесса для стабилизации качественных характеристик поверхностного слоя шлифуемой детали.
2. Разработанный алгоритм управления может быть реализован на практике при использовании современных технических средств.

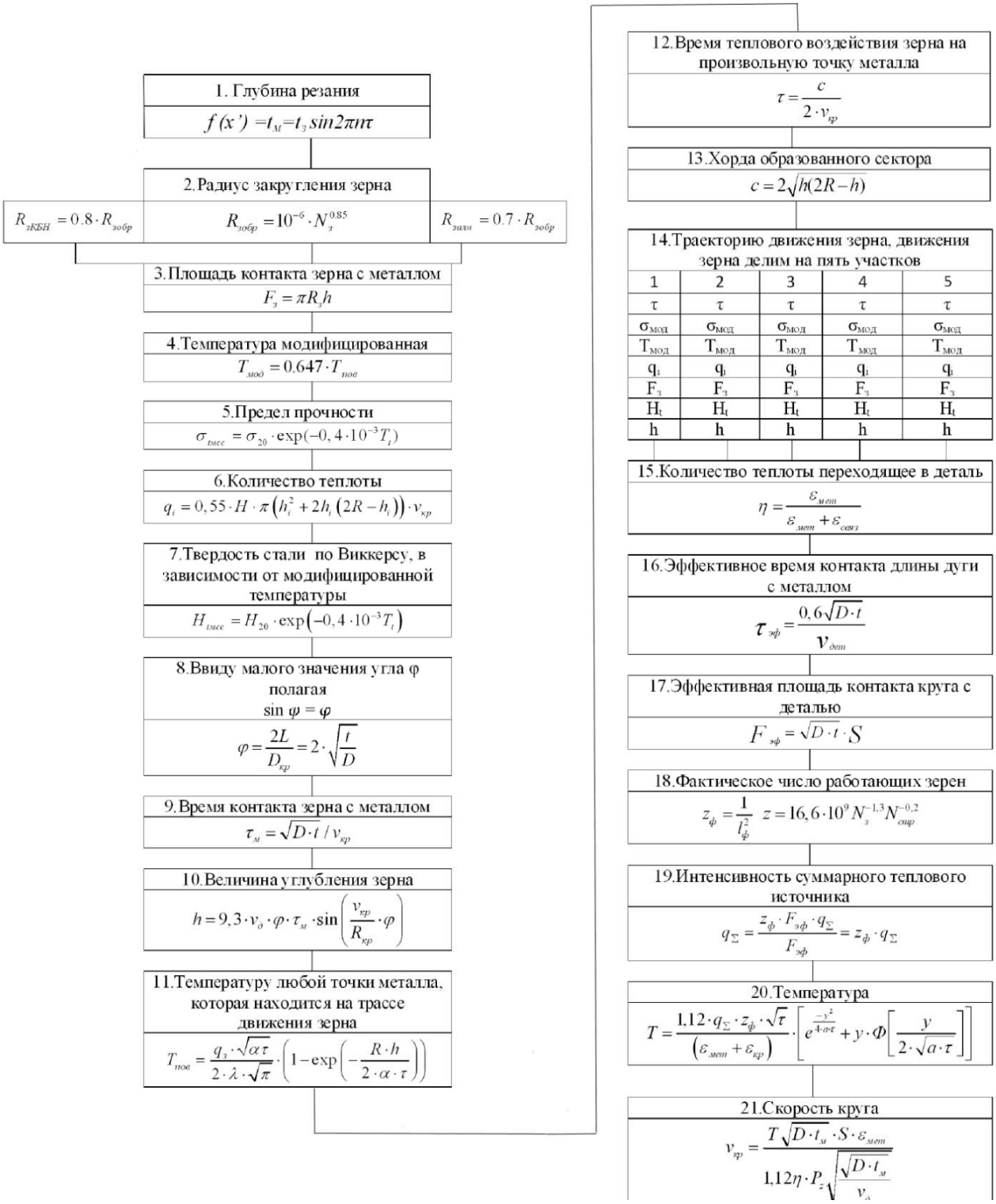


Рисунок 1 – Расчетная модель автоматического управления

Литература

1. Маслов Е.Н Теория шлифования материалов. – М: Машиностроение, 1984. – 340 с.

2. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. – Саратов: Саратовского университета, 1986. – 231 с.

3. Чирков Т.В. Математическое моделирование режимов резания при обработке материалов абразивными инструментами // Технология машиностроения. – 2004. – № 6.

4. The definition of amount of heat released during metal cutting by abrasive grain and the contact temperature of the surface being grinded / V.G. Lebedev, N.N. Klimenko, I.V. Uryadnikova et all. // Eastern–Eeuropean Journal of Enterprise Technologies. – 2016.

5. Лебедев В. Г. Технологические основы управления качеством поверхностного слоя при шлифовании: дис. д-р техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения». – Одесса, 1991.

Лебедев В.Г., Луговская Е.А., Овчаренко А.В. Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СИЛ РЕЗАНЬЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НАПЛАВЛЕНОГО СЛОЯ ИЗ МАРТЕНСИТНО–СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИСПОЛЬЗУЯ ШЛИФОВАЧНЫЕ КРУГИ ИЗ: ЭЛЬБОРА, АЛМАЗА И АБРАЗИВА

В настоящей работе осуществилось шлифование стали из разряда мартенситно-стареющих, Н18К9М5Т. Это молоуглеродистая сталь (С < 0,03%) легирована никелем, кобальтом и титаном. Данная сталь подвергается старению путем отжига в приделах 600 ^{o}С, в результате чего происходит выделение из мартенсита интермедалидных частиц типа: Ni_3Ni, NiT и Fe_2Mo. Это приводит к значительному повышению твердости стали порядком 60–62 HRC и прочность в приделах 1200 МПа. Однако при превышении температуры 550 ^{o}С происходит обратный процесс, вследствие чего теряются практически все положительные свойства стали.

Цель исследования является аналитическое определение сил резания при шлифовании мартенситно – стареющей стали. При использовании шлифовальных кругов из: алмаза, эльбора и абразива.

Значительным параметром при шлифовании является зернистость круга, так как с уменьшением размера зерна, например из 20 до 5 силы резанья возрастают от 2 до 2,5 раза. Это объяснятся тем, что уменьшается радиус режущей части зерна, однако увеличивает-

ся количество режущих зерен. В итоге чего достигается более качественная обработка поверхности.

Используя алгоритм расчетов [1], рассчитали силы резания для шлифовальных кругов эльбора, алмаза и аброзива. Режимы шлифования одинаковы для всех типов кругов, D = 450 мм; ε = $15{,}8 \cdot 10^3$ дж/м^{20}С с^{0,5}; α = $84 \cdot 10^{-6}$ м^2/с; $v_{кр}$ = 35 м/с; $v_д$ = 0,25 м/с; t = 0,03 мм; S = 2 мм. Результаты исследования изображено на рис 1.

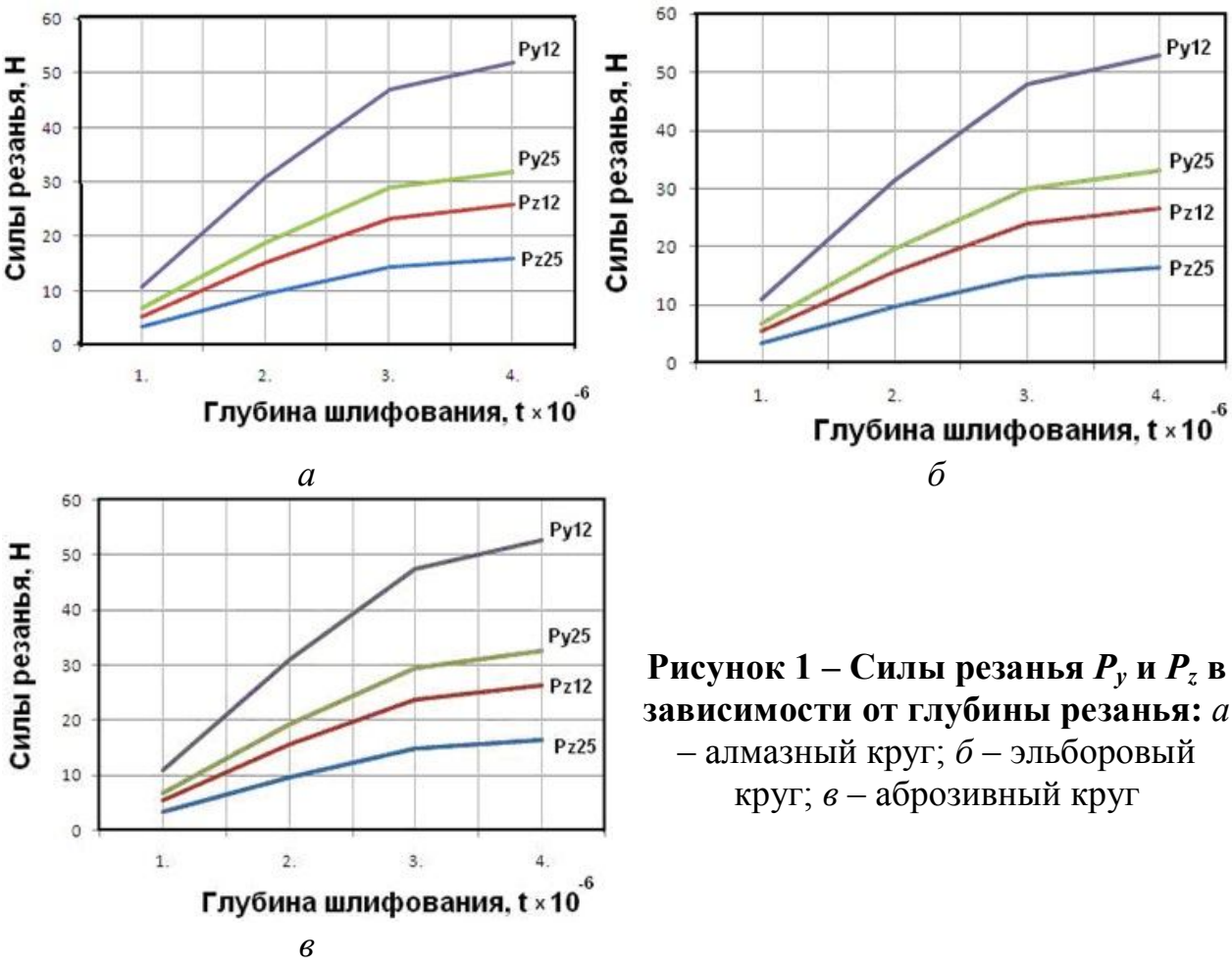


Рисунок 1 – Силы резанья P_y и P_z в зависимости от глубины резанья: *а* – алмазный круг; *б* – эльборовый круг; *в* – аброзивный круг

В диапазоне исследуемых режимов при абразивном шлифовании силы резанья P_z и P_y имеют максимальные значение соответственно при эльборовом и алмазном шлифовании эти силы резанья немного меньше.

Выводы:

На базе используемого алгоритма была построенная программа расчетов, отображающая зависимость сил резанья P_z и P_y от глубины шлифования для каждого круга. Аналитический анализ показал, что самые большие силы P_z и P_y наблюдаются у абразивного круга.

Литература

1. Определение количества теплоты, выделяющегося при резании металла абразивным зерном, и контактной температуры шлифуемой поверхности / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, И.В. Урядникова и др. // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2016.

2. Чумаченко Т.В. Технологическое обеспечение качества и производительности обработки поверхностей шеек валов роторов газовых турбин, напыленных минералокерамикой: Дис…канд. техн. наук. – Одесса 2011.

3. Контактные температуры поверхности при шлифования кругами из КБН шеек вала газовой турбины, наплавленных мартенситно – стареющей сталью и их влияние на прочностные характеристики наплавленного слоя / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, Е.А. Луговская, А.В. Овчаренко // Наукові нотатки. – Луцьк, 2016. – вып. 53.

4. Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990

Лебедев В.Г., Луговская Е.А., Овчаренко А.В. Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НАПЛАВЛЕНОГО СЛОЯ ИЗ МАРТЕНСИТНО–СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИСПОЛЬЗУЯ ШЛИФОВАЧНЫЕ КРУГИ ИЗ: КБН, АЛМАЗА И АБРАЗИВА

В настоящей работе осуществилось шлифование стали из разряда мартенситно-стареющих, Н18К9М5Т. Особенностью данного вида сталей в том при достижении температуры свыше 550 ^{o}С происходит коагуляция интерметаллидовприводящих к потере твердости, прочности и теплостойкости. Исходя из этого, важной задачей является назначение режимов шлифования, ненаносящих тепловых дефектов поверхностному слою.

Цель исследования является аналитическое определение контактных температур при шлифовании мартенситно – стареющей

стали. При использовании шлифовальных кругов из: алмаза, эльбора и абразива.

Значительным параметром при шлифовании является зернистость круга, так как с уменьшением размера зерна, например из 20 до 5 силы резанья возрастают от 2 до 2,5 раза. Такое поведения обусловлено уменьшением радиуса режущей части зерна и в тоже время увеличения количество режущих зерен. В итоге чего получаем более качественную обработку поверхности.

Аналитическое исследование проводилось с помощью созданной математической программы, которая учитывает неравномерную теплоотдачу режущего зерна при движении его по трасе [6]. Траекторию движения зерна в металле можно увидеть на рис. 1.

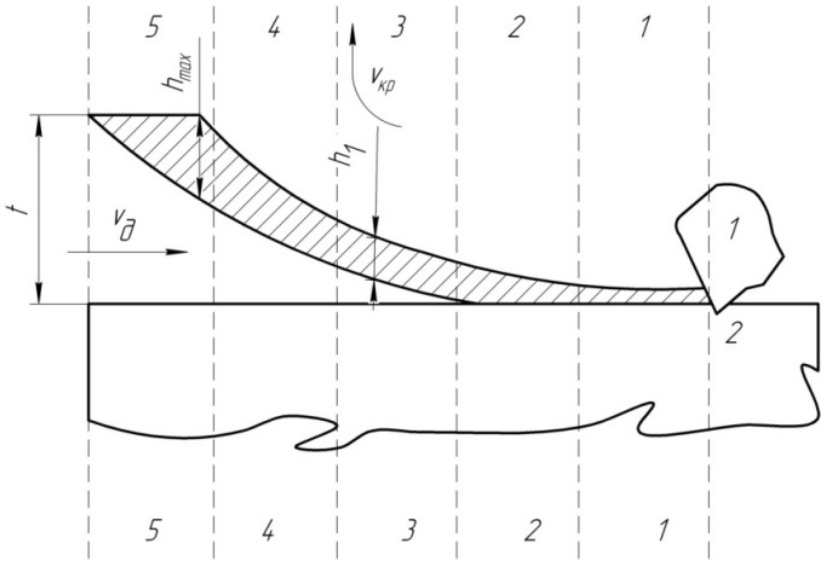


Рисунок 1 – Схема движения зерна по трассе и изменения глубины внедрения зерна в металл

Расстояние, пройденное зерном от точки контакта до разрыва с поверхностью металла разделили на *i* количество участков, в нашем случае на 5. Так как на каждом участке можно довольно легко рассчитать все параметры резания с условием того, что температура деформации металла на участке будет равна температуре резания на участке $i - 1$.

Исходя из алгоритма расчетов [1]. Для получения численных результатов установим следующие параметры процесса шлифования (для металла): плоское шлифование, 60–62 HRC, $\sigma_в$ = 2100 МПа, $\varepsilon = 13{,}1 \cdot 103$ дж/м^2 ^{o}С с^{0,5}; $\alpha = 3{,}8 \cdot 10^{-6}$ м^2/с. В зависимости контактной температуры шлифования от глубины резанья при использовании абразивного, алмазного и эльборового круга показано

на рис. 2, где *а* – Э9А25СМ1К8, D = 450 мм; ε = $1{,}1\cdot10^{3}$дж/м^{2} ^{0}С с^{0,5}; α = $5{,}3\cdot10^{-6}$ м^{2}/с; $v_{кр}$= 35 м/с; $v_{д}$= 0,25 м/с; t = 0.03мм; S = 2 мм; *б* – ЛО12С1К – 100%; D = 450 мм; ε = $3{,}84\cdot10^{3}$дж/м^{2} ^{0}С с^{0,5};α = $2{,}37\cdot10^{-6}$ м^{2}/с; $v_{кр}$= 35 м/с; $v_{д}$= 0,25 м/с; t = 0.03мм; S = 2 мм; *в* – АСР D = 450 мм; ε = $15{,}8\cdot10^{3}$дж/м^{2}^{0}С с^{0,5}; α = $84\cdot10^{-6}$ м^{2}/с; $v_{кр}$= 35 м/с; $v_{д}$= 0,25 м/с; t = 0.03мм; S = 2 мм.

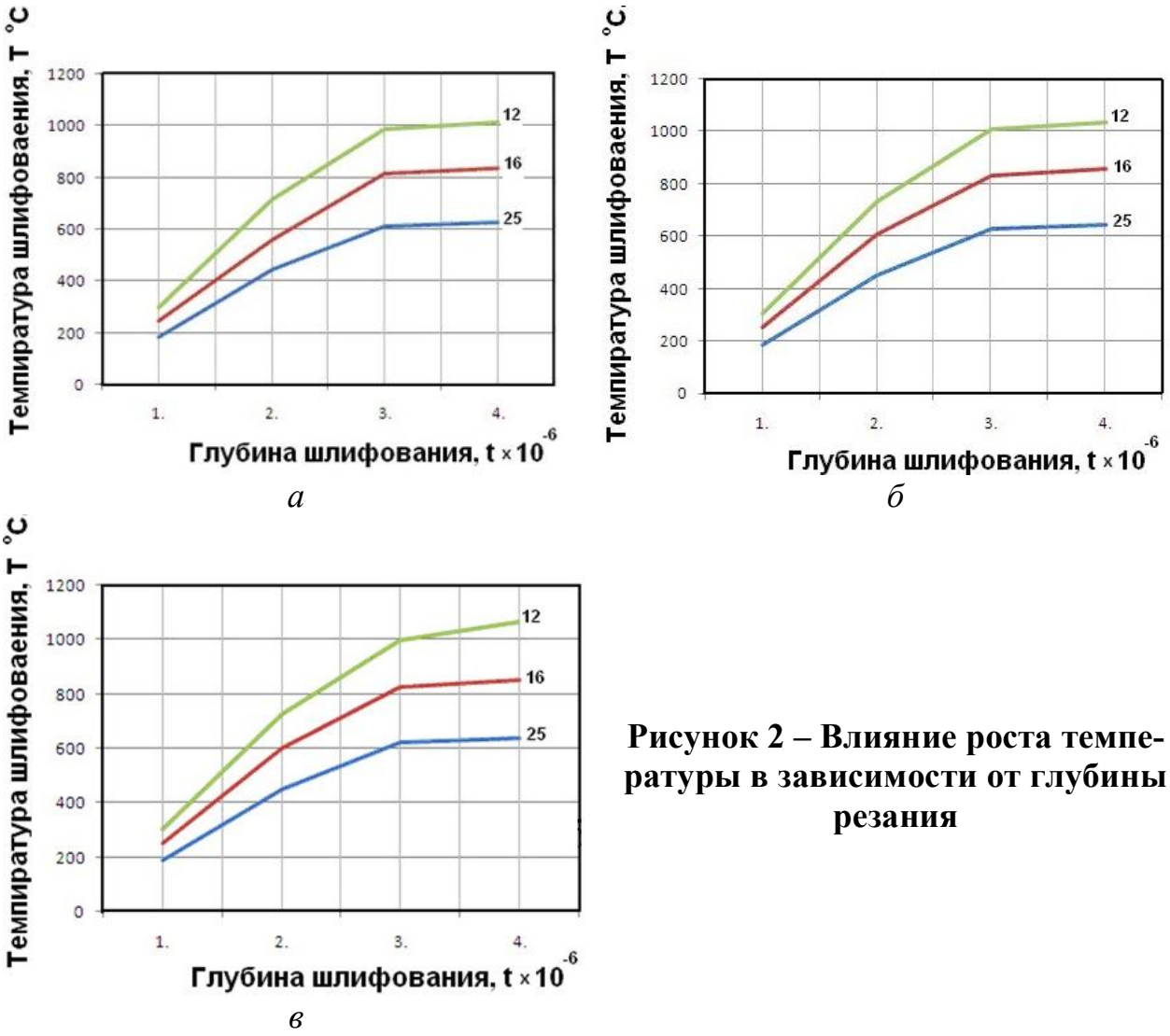


Рисунок 2 – Влияние роста температуры в зависимости от глубины резания

Вывод. На базе используемого алгоритма была построенная программа расчетов, отображающая зависимость контактных температур от глубины шлифования для каждого круга. Наиболее лучший результат показал круг из КБН.

Литература.

1. Определение количества теплоты, выделяющегося при резании металла абразивным зерном, и контактной температуры шлифуемой поверхности / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, И.В. Урядни-

кова и др. // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2016.

2. Чумаченко Т.В. Технологическое обеспечение качества и производительности обработки поверхностей шеек валов роторов газовых турбин, напыленных минералокерамикой: Дис…канд. техн. наук. – Одесса 2011.

3. Контактные температуры поверхности при шлифования кругами из КБН шеек вала газовой турбины, наплавленных мартенситно – стареющей сталью и их влияние на прочностные характеристики наплавленного слоя / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, Е.А. Луговская, А.В. Овчаренко // Наукові нотатки. – Луцьк, 2016. – вып. 53.

4. Резников А.Н. Теплофизика резания.– М.: Машиностроение, 1969.

Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В. Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

КИНЕТИКА ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

Фазово-структурные изменения в поверхностном слое закаленной стали при шлифовании называют шлифовочными прижогами. Наиболее часто тепловые шлифовочные дефекты образуются у цементируемых, улучшаемых высокоуглеродистых сталях низко- и средне легированных, со структурой мартенсита или отпущенного мартенсита [1–3]. Прижеги снижают прочность, надежность и долговечность прошлифованной поверхности, а, следовательно, и всей детали [3].

Для аналитического исследования фазово-структурных превращений в поверхностном слое при шлифовании проведены следующие исследования.

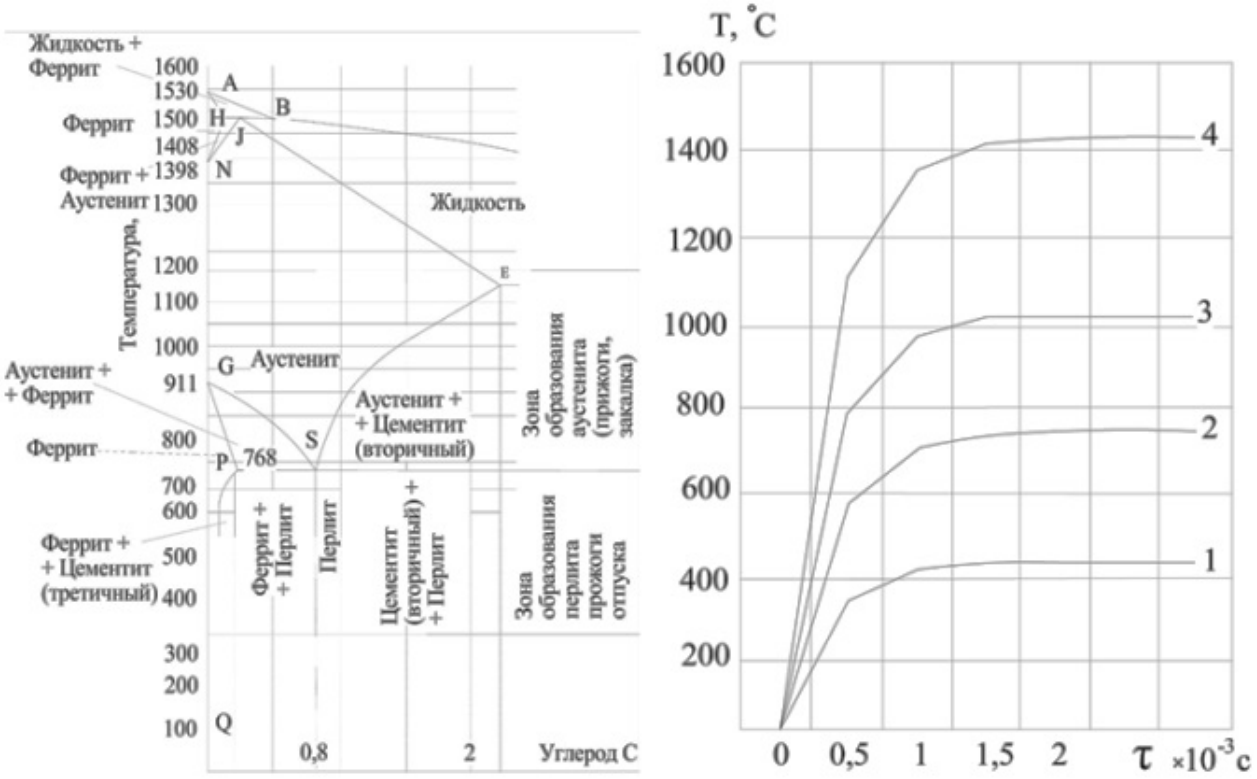
1. Определены скорости нагрева в диапазоне 3-го превращения отпуска и в диапазоне выше точки Ac_1, причем скорости нагрева в районе температур 3-го превращения отпуска определялись для двух случаев: 1-й температура не повышается выше Ac_1 и 2-й случай, когда температура повышается выше Ac_1.

2. Определена вероятность скоростного отпуска мартенсита и образование аустенита по схеме мартенсит – перлит – аустенит, на основе

чего определены температуры, при которых происходит образование аустенита для различных сталей, в зависимости от химсостава.

3. Определены предельные температуры, которые не вызывают тепловых дефектов и принципы определения режимов шлифования, которые обеспечивают не превышение предельных температур.

Скорости нагрева при шлифовании оцениваются как 10^6–10^8 °С/с. в ряде случаев при таких условиях возможен диффузионный распад мартенсита и образование перлитных структур. В работе **[**3**]** приводятся скорости нагрева и температурные интервалы, при которых возможен диффузионный распад мартенсита. Совмещение кривых нагрева рассчитанных по материалам [1, 2] и стальной части диаграммы показаны на рис. 1.



а *б*

Рисунок 1 – Совмещение кривых нагрева и стальной части диаграммы: *а* – таблица железо–углерод; *б* – график роста температуры в зависимости от глубины резания

Для получения широкого диапазона контактных температур был выбран шлифовальный круг зернистости 12 (Э9А12СМ1К6) из электрокорунда и режимы шлифования $V_{кр}$= 35 м/с, $V_{дет} = V_и$ = 0.66 v/c, глубины шлифования t = 0,01; 0,015; 0,02; 0,04 мм. Измеряя скорости нагрева в диапазоне температур от 400 °С до Ac_1, можно получить следующие значения: $V_4 = 3 \cdot 10^6$ °С/с; $V_3 = 2 \cdot 10^6$ °С/с; $V_2 = 0{,}3 \cdot 10^6$ °С/с.

Таким образом, можно сделать вывод, что в подавляющем большинстве случаев при нагреве закаленной поверхности детали в районе температур 3-го превращения отпуска и выше распад мартенситной структуры и образование аустенита происходит по схеме М–П–А.

Сопоставляя скорость диффузии углерода в Fe_γ с учетом наличия легирующих элементов и концентрации самого углерода, можно получить значения температур образования аустенита для различных сталей (табл. 1).

Таблица 1 – Температура образования аустенита Ac_1 при диффузионном α→γ превращении под действием контактной температуры шлифования

Исходные данные			Марка стали			
$v_{кр}$, м/с	$v_д$, м/с	$v_н$, °С/с	45 0,45% С	У8 0,8% С	12Х2Н4А цементация +закалка 1,2% С	ШХ15 1% С
35	0,583	3257262	797	797	870	870
45	0,75	5390	798	798	871	871
50	1,0	10353422	799	799	872	872

Примечание: средняя скорость нагрева *v* н, °С/с рассчитана в интервале 700–1500 °С

Выводы

1. Скорости нагрева поверхности при шлифовании в диапазоне температур при которых возможно 3-е превращение отпуска составляют $3 \cdot 10^6$ °С/с; – $0{,}3 \cdot 10^6$ °С/с.

2. Образование аустенита в поверхностном слое детали при шлифовании в большинстве случаев происходит за счет диффузионного механизма.

3. Температура образования аустенита при шлифовании для доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей находится в диапазоне 800–890 °С и имеет тенденцию к повышению при увеличении скорости нагрева.

Образовавшийся аустенит подвергается интенсивному наклепу режущими зернами и имеет искаженную наклепом кристаллическую решетку.

При обработке температура шлифования должна быть не выше температур образования аустенита, величина которых рассчитывается по зависимостям данной работы.

Литература

1. Закономерности образования прижогов отпуска при шлифовании подшипниковых сталей / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко // Перспективні технології та прилади. – 2015. – № 6. – С. 35–40.

2. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, С.А. Аджелат, // Наукові нотатки. – Луцьк, 2013. – вып 40. – С. 141–144.

3. Отпуск мартенсита в ходе быстрого нагрева / Д.А. Мирзоев, А.А. Мирзоев, П.В. Чирков // Вестник ЮУрГУ, серия «Математика. Механика. Физика» – 2016, – т. 8, № 1. – С. 61–65

Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В., Фроленкова О.В.
Одесский национальный политехнический
университет, Одесса, Украина

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГЛУБИНЕ НАПЫЛЕННОГО ТЕРМОБАРЬЕРНОГО СЛОЯ ZRO_2 ПРИ ШЛИФОВАНИИ АБРАЗИВНЫМИ ЭЛЬБОРОВЫМИ И АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

По различным причинам большинство деталей современного машиностроения выходит из строя, и требуют быстрого, экономически выгодного и качественного восстановления. Одно из направлений, где возникает острая необходимость решения задач, связанных с повышением надежности и улучшения эксплуатационных характеристик – это ресурс газотурбинных установок для чего используются т.н. термобарьерные покрытия, которые наносятся на рабочие поверхности деталей ГТУ.

Покрытия, которые наносятся газотермическими методами, придают рабочим поверхностям деталей повышенные твердость, термостойкость, антикоррозионные и многие другие свойства.

В настоящее время считается перспективным материалом керамика на основе диоксида циркония (ZrO_2) частично стабилизированного оксидом иттрия (Y_2O_3) и керамика на основе оксида алюминия (Al_2O_3). Керамика на основе диоксида циркония отличается высокой прочностью и устойчивостью к образованию трещин; низкая тепло-

проводность ZrO_2 затрудняет теплоотвод при трении. Высокое значение коэффициента термического расширения благоприятствует сочленению деталей из диоксида циркония с металлическими и стальными деталями. К преимуществам керамики еще можно отнести высокую коррозионную стойкость и устойчивость к воздействию большинства органических и неорганических кислот и солей.

Все покрытия деталей ГТУ должны проходить механическую размерную обработку, как правило, это шлифование, которое придает окончательную точность и шероховатость напыленной поверхности.

В процессе шлифования возникают высокие контактные температуры, величины которых сопоставимы с рабочими температурами или же несколько выше этих температур. При шлифовании напыленная поверхность подвергается практически мгновенному нагреву и очень быстрому охлаждению, что может вызвать высокие значения остаточных напряжений в прошлифованном слое и трещины этого слоя. В этом случае резко снижается надежность и долговечность прошлифованных поверхностей, а, следовательно, всей детали в целом.

Задача при проектировании технологического процесса шлифования заключается в первую очередь в управлении тепловым режимом обработки с целью поддержания его в таких пределах, когда остаточные напряжения имеют значения, не представляющие опасности для надежности долговечности напыленного слоя.

Управление тепловым процессом можно осуществлять за счет изменения материала зерен шлифовального круга, назначения оптимальных режимов обработки, за счет применения СОЖ и других методов охлаждения.

Для выбора материала зерен шлифовального круга необходимо знать, как материал абразивных зерен будет влиять на контактную температуру шлифования. Экспериментальные исследования в этой области весьма трудоемки и длительны. Кроме того, невозможно охватить широкий диапазон сочетаний режимов обработки и характеристик шлифовальных кругов.

Учитывая, что в настоящее время, кроме ZrO_2 появилось и появляется большое количество термобарьерных покрытий, которые должны шлифоваться, было бы полезно проанализировать заблаговременно контактные температуры шлифования и остаточные напряжения в поверхностном слое после шлифования на предмет выбора оптимального варианта технологии, которая не дает высоких напряжений и трещин.

Поскольку экспериментальное этого вопроса, как указывалось выше, затруднено, то в настоящей работе предлагается аналитический анализ температурного процесса при шлифовании на основе разработанных математических моделей тепловых процессов. Этот анализ дает возможность достаточно быстро оценить напряженное состояние поверхностного слоя после шлифования на основании чего можно выбрать оптимальный вариант сочетания материала абразивных зерен и режимов обработки обеспечивающих необходимые качественные характеристики напыленной поверхности.

При использовании новых термобарьерных покрытий это дает возможность значительно сократить время, необходимое для назначения оптимальной технологии шлифования.

В настоящей работе был сделан аналитический анализ процесса шлифования на примере плоских образцов. Расчеты проводились с помощью математических программ разработанных на основе исследования процесса шлифования, выполненного в предыдущих работах [1,2] и в настоящем исследовании. Результаты исследований представлены на рис. 1 и 2.

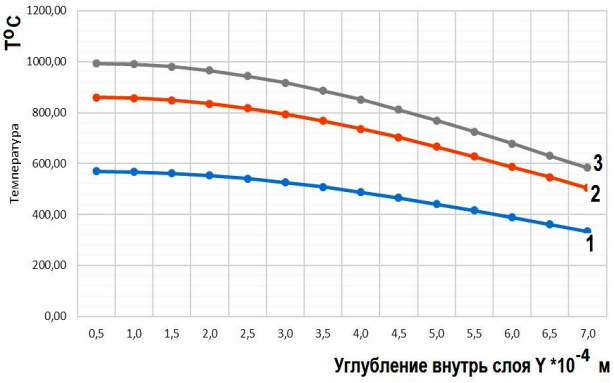


Рисунок 1 – Значения контактных температур и температур по глубине напыленного слоя при шлифовании кругами: 1 – круг АСР 160×125К1 100%; 2 – круг ЛО 160×125К1 100%; 3 – круг Э9А16СМ1К5

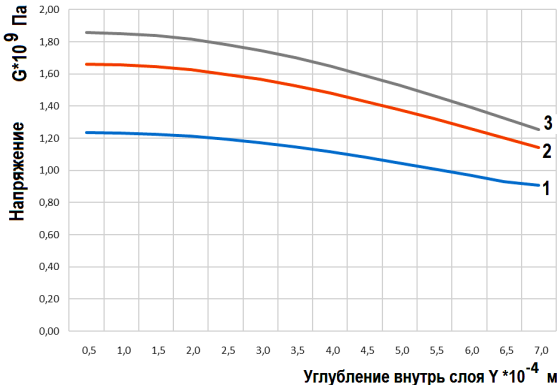


Рисунок 2 – Значения остаточных напряжений по глубине напыленного слоя при шлифовании кругами: 1 – круг АСР 160×125К1 100%; 2 – круг ЛО 160×125К1 100%; 3 – круг Э9А16СМ1К5

Выводы. Аналитическое исследование с помощью разработаных программ дает возможность в короткие сроки проектировать оптимальный процесс шлифования любого термобарьерного покрытия значительно сокращая время экспериментальных исследований.

Литература

1. Чирков Т.В. Математическое моделирование режимов резания при обработке материалов абразивными инструментами // Технология машиностроения. – 2004. – № 6.

2. V.G. Lebedev, N.N. Klimenko, I.V. Uryadnikova et all. The definition of amount of heat released during metal cutting by abrasive grain and the contact temperature of the surface being grinded // Eastern–Eeuropean Journal of Enterprise Technologies. – 2016.

Лопата Л.А. Институт проблем прочности
им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев,
Волков Ю.В. Национальный университет
«Одесская морская академия», Одесса,
Соловых А.Е., *Катеринич С.Е.* Центральноукраинский
национальный технический университет,
Кропивницкий, Украина

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАЛОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Эффективное использование дизель-генераторов (ДГ) в значительной степени зависит от их технического состояния. Одной из проблем ремонтного производства ДГ является восстановление и упрочнение валов (распределительных и коленчатых). Среди существующих способов восстановления и упрочнения валов ДГ наибольшую часть занимают сварочные технологии. С помощью сварки и наплавки восстанавливаются изношенные поверхности валов путем нанесения на их рабочие поверхности покрытий, которые противодействуют абразивному, коррозионному и другим видам износа и разрушения. Вместе с тем, повышенное тепловыделение при нанесении слоев большой толщины методами наплавок и напыления искажает геометрию восстанавливаемой детали, снижает ее ресурс, а наплавка покрытий больших толщин требует снятия значительных припусков при финишной механической обработке [1]. Методы наплавки не обеспечивают сохранение исходных свойств материала покрытий, вносят существенные изменения в структуру материала упрочняемой детали. Связано это с тем, что материал покрытия нагревается до

температур, превышающих его температуру плавления, что приводит к снижению физико-механические свойства покрытий и в итоге невозможно получить высокие эксплуатационные свойства восстанавливаемых деталей [1]. Перспективным и эффективным средством решения этой проблемы является применение износостойких покрытий дискретной структуры [2–3].

Принцип формирования дискретных покрытий заключается в том, что традиционный сплошной слой покрытия заменяют на прерывистый слой мозаично-дискретной структуры. Принцип покрытий дискретной структуры реализуется различными технологическими способами: дискретной точечной закалкой, лучом лазера, газотермическими, детонационно-газовым и электролитическим способами, ионным азотированием, вакуумными технологиями [2]. Вакуум-плазменные технологии оказались наиболее эффективны для дискретных покрытий на металлорежущем инструменте [3]. Наиболее простой в реализации нанесения дискретного покрытия способ электроискрового легирования (ЭИЛ) [4], который дискретен по своей природе.

Однако существующее технологическое обеспечение дискретных покрытий позволяют использовать их в основном для упрочнения поверхностей деталей и нанесения покрытий толщиной до 1 мм. При восстановлении и ремонте изношенных деталей, когда необходимо реставрировать детали и наращивать слои толщиной свыше 1 мм с высокими прочностными характеристиками, применяемое технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры не решает поставленных задач [2–4].

Из широкого спектра современных методов инженерии поверхностей восстанавливать детали с величиной износа более 1 мм позволяют электроконтактные методы [1]. Из всех рассмотренных способов восстановления, метод электроконтактного припекания металлических порошков (ЭКПП) полностью отвечает вишеуказанным положениям и не имеет себе равных по достигаемому уровню адгезионной прочности (150–220 МПа), больших толщин покрытия (до 3 мм и более) при минимальном уровне остаточных напряжений в сравнении с наплавкой и газотермическим напылением. Преимуществами этих методов являются низкая энергоемкость процесса, высокая производительность, отсутствие излучения и газовыделения, минимальные припуски на финишную обработку [1]. При этом температура восстанавливаемой детали не превышает 60–80 °С, отсутствует термическое коробление и поводки детали, что очень

важно при реставрации таких деталей, как валы. Однако, в этих работах по ЭКПП [1] отсутствуют исследования по разработке технологии восстановления деталей типа «вал» электроконтактным припеканием дискретных покрытий (ЭКПДП).

Цель исследований – создание нового способа восстановления валов ДГ дискретными износостойкими покрытиями методом электроконтактного припекания (ЭКП) композиционных порошков путем определения геометрических параметров дискретов за счет минимизации напряженно-деформированного состояния (НДС).

В результате проведенных исследований разработан способ восстановления валов ДГ покрытиями дискретной структуры, которые получены методом ЭКПП [5–6]. Исследованы параметры процесса ЭКПДП, износостойкость, адгезионно-когезионная прочность, пористость, микротвердость покрытий. Разработанная технология ЭКПД была использована при восстановлении распредвалов дизель-генераторов (рис. 1). Ресурс работы деталей увеличился в 2–3 раза.

а *б*

Рисунок 1 – Распределительный вал 150.03.022-1 дизель-генератора 6ЧН 12/14 (*а*) и примеры участков распределительных валов ДГ с покрытиями дискретной структуры (*б*), полученными электроконтактным методом

Выводы. Впервые предложен способ восстановления валов ДГ, заключающийся в нанесении дискретных композиционных покрытий с повышенной адгезионной прочностью и толщиной электроконтактным припеканием порошковых материалов, который обеспечивает повышенный уровень физико-механических свойств рабочих поверхностей.

Литература

1. Лопата Л.А., Красота М.В. Совершенствование технологии восстановления деталей типа «вал» электроконтактным припеканием металлических порошков // Теоретические и технологгические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. научн. трудов / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: ПГУ, 2001. – С. 300–303.

2. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // Технологические системы – 2001.– № 4. – С. 17–25.

3. Технологическое обеспечение вакуум-плазменных покрытий дискретной структуры / Е.К. Соловых, Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский и др. // Технологические системы. –2007. – № 2. – С. 22–27.

4. Оптимизация дискретных структур электроискровых покрытий / Б.А. Ляшенко, В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, Л.А. Лопата // Артилерийское и стрелковое вооружение: Международ. науч.-техн. сб. – К., 2004. – Вип. 4(13). – С. 30–34.

5. Получение износостойких дискретных покрытий электроконтактным припеканием / Л.А. Лопата, Б.А. Ляшенко, В.И. Калиниченко, Ю.В. Волков // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.:НАУ, 2009. – № 51. – С. 139–148.

6. Волков Ю.В., Ляшенко Б.А., Лопата Л.А. Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры. Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием. – Проблемы тертя та зношування. – К.: НАУ, 2015. – № 2(67). – С. 110–126.

Ляшенко Б.А. Інститут проблем міцності
ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ,
Кузін М.О. Львівська філія ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна, Львів
Агєєв М.С. Херсонська державна морська академія, Херсон
Чиграй С.Л. НТУ України «Київський політехнічний
інститут ім. І. Сікорського», Київ,
Михайлюта С.С. Центральноукраїнський національний
технічний університет, Кропивницький, Україна

УПРАВЛІННЯ ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ ПОРИСТИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ

Одним із завдань сучасної інженерії поверхні є забезпечення параметрів міцності та довговічності поверхневих шарів, а у випадку втрати геометричних характеристик деталей в результаті зношування, відновлення їх профілю з одночасним забезпеченням новосформованих областей поверхні необхідним комплексом експлуатаційних вла-

стивостей. Характерною особливістю методів поверхневого зміцнення є те, що одночасно не вдається підвищити експлуатаційні властивості деталі для всього спектру режимів роботи. Усунення цього недоліку покриттів досягається при використанні багатоопераційних технологій та нанесенні багатошарових, багатофункціональних покриттів [1]. Однією з технологій, що використовується в сучасному машинобудуванні є газотермічне напилення (ГТН) покриттів [2]. Її застосування зумовлене достатньою простотою відновлення геометрії поверхонь деталей, відносно невеликою вартістю обладнання та ціни відновлення конкретного виробу [2]. Разом з тим покриття, отримані за допомогою ГТН мають ряд недоліків. До них відносять низьку міцність зчеплення з основою, високу пористість та недостатню твердість [2]. Суттєво підвищити ці властивості можна за допомогою додаткової хіміко-термічної обробки, зокрема, термоциклічного іонно-плазмового азотування (ТЦ ІА). Використання такого варіанту інтегрованих технологій дозволяє суттєво підвищити довговічність елементів конструкцій, що працюють в умовах абразивних та ерозійних навантажень [2].

Метою роботи є побудова математичних співвідношень, що дозволяють проводити управління дифузійним насиченням пористих покриттів в умовах іонного азотування для підвищення експлуатаційних характеристик приповерхневих шарів.

Ефект прискореної дифузії речовини, що отримав назву «аномальний масоперенос», реалізується в різних видах механіко-термічної обробки матеріалів, і на даний час використовуються для підвищення експлуатаційних властивостей поверхневих шарів деталей, які працюють в умовах контактних навантажень. Особливо чітко процес аномального масопереносу реалізується при ТЦ ІА [2]. Широке впровадження даного ефекту призводить до необхідності управління цим явищем – вибором таких параметрів зовнішніх впливів, які формують покриття із заданим комплексом властивостей. Для розв’язання даної проблеми будемо використовувати підходи термодинаміки – дифузійну теорію пружності Підстригача Я.С. та локально-нерівноважну термодинаміку Бурака Я.Й. [3, 4]. До факторів, які мають вплив на швидкість масоперенесення, відносять: температуру, параметри зовнішніх силових впливів, структурно-фазовий стан матеріалу в початковий момент часу. При цьому швидкість деформації є одним з визначальних фактором, а залежність коефіцієнта дифузії в середовищі від швидкості деформації має вид:

$$D_M = D_0 + C\left|\dot{\varepsilon}\right|^{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{\beta}{T}\right), \quad (1)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії у випадку відсутності деформацій, $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформацій, α, β – константи, T – температура.

Процес іонного азотування включає в себе наступні етапи [5]: підведення азоту з відповідного середовища до поверхні деталі; утворення приграничного шару біля поверхні деталі, де на міжфазній межі середовище-метал відбувається дисоціація азотовмісного середовища і адсорбція поверхнею атомів азоту; проникнення атомів азоту через поверхню в матеріал деталі; дифузія атомів азоту у поверхневий шар по границях зерен і через зерна. При цьому керуючими параметрами є: 1) температура насичення; 2) тиск газу; 3) склад газу; 4) час повної обробки; 5) форма і часова інтенсивність енерговведення [5]. При проходженні дифузійних процесів у пористих середовищах коефіцієнт дифузії суттєво залежить від структури середовища [6], яке в загальному випадку може задаватись довільною кількістю змінних. В цьому зв'язку, представимо коефіцієнт дифузії пористих покриттів, який залежить як від параметрів зовнішніх енергетичних впливів, так і від характеристик пористості напиленого покриття:

$$D_M = D_M\left(\left\{\Pi_k^i\right\}_{i=1,\ldots;k=1,\ldots}; \left\{\theta_j\right\}_{j=1,\ldots}\right), \quad (2)$$

де D_M – коефіцієнт масопереносу, Π_k^i – параметри енергетичних впливів під час технологічної модифікації, θj – змінні, що описують пористість структури покриття; i, j, k – біжучі індекси.

Оскільки в загальному випадку встановлення залежностей типу (1) на даний момент є відкритою проблемою, запропонуємо наступне подання коефіцієнту масопереносу у виді лінійного адитивного розкладу у ряд по основним змінним:

$$D_M = \sum_{i,k} C_{i,k}\Pi_k^i + \sum_j A_j\theta_j, \quad (3)$$

де $C_{i,k}$, A_j – емпіричні коефіцієнти.

При постановці задачі управління дифузійним насиченням приповерхневих шарів важливим є вибір критерію (функціоналу), згідно якого буде проводитись встановлення оптимального розв'язку. В даній роботі в якості критерію оптимальності пропонується величина (глибина) насиченого шару, отриманого в результаті технологічної модифікації:

$$L \to \max. \tag{4}$$

З врахуванням залежності функціоналу (3) від параметрів пористості конструкції та зовнішніх енергетичних впливів

$$L \equiv L\left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1,\ldots;k=1,\ldots} ; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1,\ldots} \right) \tag{5}$$

задача управління дифузійним насиченням приповерхневих шарів в умовах термоциклічного іонного азотування має вид:

$$\begin{cases} \Pi_k^i - ? \\ L \equiv L\left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1,\ldots;k=1,\ldots} ; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1,\ldots} \right) \to \max \end{cases}. \tag{6}$$

Розв'язання задачі (5) можна проводити за допомогою розкладу функціоналу (4) в системі базисних функцій Π_k^i за допомогою методу зважених нев'язок – методу Гальоркіна, або за допомогою чисельних наближень з використанням методу градієнтного спуску, на основі модельних, або розширених уявлень, які описані в праці [2].

Висновки. Підвищення функціональних властивостей пористих покриттів вимагає вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами у приповерхневих шарах деталей отриманих в результаті газотермічного напилення. Представлений аналіз сучасних моделей механіки, що описують взаємопов'язані процеси силової, термічної та дифузійної природи і фізичні уявлення про вплив структурних параметрів на інтенсивність масопереносу в пористих середовищах. На основі проведеного аналізу запропонована постановка задачі управління дифузійним насиченням пористих покриттів в умовах термоциклічного іонного азотування.

Література

1. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости/ Б.А. Ляшенко, Е.К. Соловых, В.И. Мирненко. Под ред. В.В. Харченко. – К.: Ин-т проблем прочности, 2010.–193 с.

2. Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих защитных покрытии й/ Б.А. Ляшенко, Л.А. Лопата, Е.К. Соловых и др. //Конструювання, експлуатація та виробництво сільськогосподарських машин. – 2011. – вип. 41, ч. 11. – С. 9–19.

3. Введение в механику поверхностных явлений в деформируемых твердых телах / Я.С. Подстригач, Ю.З. Повстенко. – К.: Наукова думка, 1985. – 200 с.

4. Бурак Я.Й. Визначальні співвідношення локально-градієнтної термомеханіки // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1987. – № 12. - С. 19–23.

5. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Шпис, З. Бемер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.

6. Трехмерные капиллярно-пористые покрытия / В.И. Калита, В.Н. Соколов, В.А. Парамонов // Физика и химия обработки поверхности. – 2000. – № 4. – С. 55–61.

Максимова С.В., Воронов В.В., Ковальчук П.В.
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИПОЕВ БЕЗ БОРА

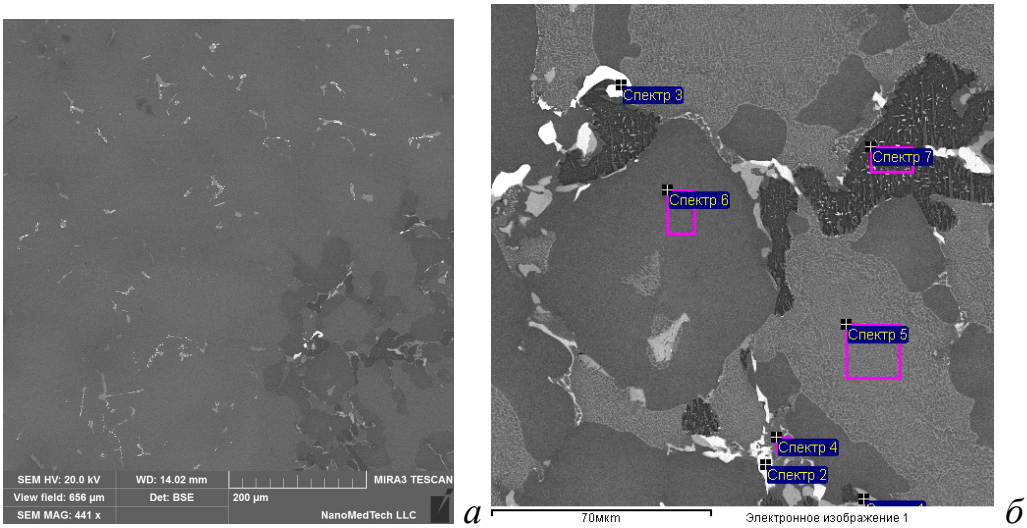
При изготовлении деталей горячего тракта газотурбинного двигателя широко используются жаропрочные литейные никелевые сплавы. Жесткие условия эксплуатации при повышенной температуре, действующих напряжениях в коррозионно-активной среде приводят к активному износу, появлению дефектов в виде пор и трещин. Поэтому возникает необходимость в ремонте, устранении дефектов путем высокотемпературной пайки. Использование припоев, содержащих бор и кремний приводит к образованию в паяных швах хрупких легкоплавких эвтектик, которые снижают длительную прочность паяных соединений.

В данной работе приведены структурные особенности паяных соединений жаропрочного никелевого литейного сплава ЖС 6У, полученных с использованием многокомпонентного никелевого припоя системы Ni-Cr-Me(Co, Al), который не содержит бор и кремний.

Для проведения пайки использовали вакуумную печь с радиационным нагревом, температуру контролировали двумя термопарами, расположенными на паяемом образце и в центральной зоне вакуумной камеры. В качестве основного металла использовали литые пластины высоколегированного жаропрочного никелевого литейного сплава ЖС6У (Ni-(8-9,5)Cr-(9-10,5)Co-(9,5-11,0)W-(5,1-6,0)Al-(2-2,9)Ti-(1,2-2,4)Mo-(0,8-1,2)Nb-1Fe-(0,13-0,02)C). Данный сплав относится трудно-

свариваемым в связи с возникновением горячих трещин в зоне термического влияния и сварном шве из-за выделения большого количества упрочняющей γ'-фазы [1, 2]. Микроструктуру паяных соединений и элементный состав отдельных фаз исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа TescanMira 3 LMU, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm^2, под управлением программного пакета INCA.

Внешний осмотр полученных паяных соединений выявил хорошее растекание припоя по паяемому металлу с образованием плавных галтельных участков. Проведенные микрорентгеноспектральные исследования показали, что визуализиролвать шов очень сложно, мы имеем однородное соединение с общими зернами на межфазной границе (рис. 1, *а*). В галтельном участке кристаллизуется припой, в котором преобладающей первичной фазой являются зерна твердого раствора на основе никеля, содержащие легирующие элементы как припоя, так основного металла. По границам зерен наблюдаются светлые выделения дисперсных частиц на основе вольфрама, содержащие повышенную концентрацию молибдена, а также выделения фазы на основе никеля, обогащенные алюминием (рис. 1, *б*, табл. 1).



а *б*

Рисунок 1 – Микроструктура (*а*) и исследуемые участки в галтельной зоне (*б*) паяного соединения сплава ЖС6У

Полученные результаты исследований показали, что при капиллярной пайке жаропрочного никелевого сплава ЖС6У протекают диффузионные процессы, приводящие к выравниванию концентрации составляющих элементов припоя и основного металла, что приводит к формированию однородных паяных соединений, в которых паяный шов сложно идентифицировать.

Таблица 1 – Химическая неоднородность паяного соединения сплава ЖС6У

№ спектра	Химические элементы, масс. %							
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	0,90	1,65	32,79	13,07	18,78	0,00	18,66	14,15
2	2,71	2,87	15,68	11,45	24,65	0,92	17,39	24,33
3	0,18	0,27	6,56	0,86	3,39	0,00	23,93	64,81
4	3,11	4,91	18,67	11,39	43,13	0,49	9,64	8,65
5	5,32	4,12	7,77	10,17	59,95	0,00	2,95	9,72
6	6,44	6,15	4,61	9,02	66,15	0,00	1,64	5,99
7	12,43	7,61	7,88	10,13	56,55	0,65	1,69	3,08

Литература

1. Кратковременная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием борсодержащего припоя с присадкой кремния / И.С. Малашенко, В.В. Куренкова, А.Ф. Белявин, В.В. Трохимченко // Современ, электрометаллургия. – 2006. – № 4. – С. 26-42.

2. Курочко Р.С. Сварка и пайка жаропрочных материалов горячего тракта ГТД // Авиационная промышленность. – 1982. – № 8

Маленко П.И., Релмасира К.Д., Леонов А.Ю.
Тульский государственный университет, Тула, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ НИКОТРИРОВАННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ СМАЗЫВАНИЕМ

Аналитические и экспериментальные методы исследований происходящих при работе пары трения скольжения в поверхностных слоях никотрированных теплостойких сталей структурно-фазовых превращений, связанных с образованием вторичных структур, относятся, прежде всего, к исследованиям изменения структуры и свойств поверхностной зоны в макромасштабном измерении (континуальное

приближение). В этой связи не учитываются вид симметрии кристаллических решеток, их точечные и линейные дефекты и анизотропия структуры.

Для учета подобных характеристик необходимо использовать дискретные методы исследований, в частности, метод молекулярной динамики (ММД), который базируется на класссических методах моделирования систем. Главный смысл метода состоит в том, чтобы генерировать совокупность конфигураций атомов, распределенных по определенным законам распределения, то есть статистический ансамбль.

С использованием ММД проводили моделирование объемных дефектов (в данном случае межзеренных границ), основу современной теории которых составляют решеточные модели. В данных моделях основное внимание уделяется углам границ (большеугловые и малоугловые границы) и собственно толщине границы *d*. Согласно работе [1] экспериментальные значения толщин границ зерен составляют $d = (2–4)a$, где a – параметр кристаллической решетки. Однако данные значения не отражают температурной зависимости значения *d*. Подобная зависимость приведена в работе [2]. Предложена следующая зависимость для определения значения *d*

$$d = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{k^{(2)}}{3\overline{T}\overline{\Omega}T_c}}\alpha\frac{1}{\sqrt{\overline{T}}}, \qquad (1)$$

где $k^{(2)}$ – "условный" межатомный потенциал (для α-Fe $k^{(2)} = 4{,}3$ эВ); $\overline{T} = \frac{T_c - T}{T_c}$ – относительная температура (для α-Fe T_c = 1073 К); $\alpha = 2{,}3\cdot10^3$ – коэффициент приведения координат решеточной модели и модели Гинсбурга-Ландау; $\overline{\Omega}$ – предельное значение обратной плотности атомов, имеющая размерность объема (м^3).

$$\overline{\Omega} = \Omega^{(1)}n, \qquad (2)$$

где $\Omega^{(1)}$ – атомная плотность в решетке; n – число решеток в межзеренной границе.

Для α-Fe $\Omega^{(1)} = 7{,}5\cdot10^{-29}$ м^3, $n \approx 10^3$, откуда $\overline{\Omega} = 7{,}5\cdot10^{-23}$ м^3.

Результаты расчетов по формуле (1) приведены в табл. 1.

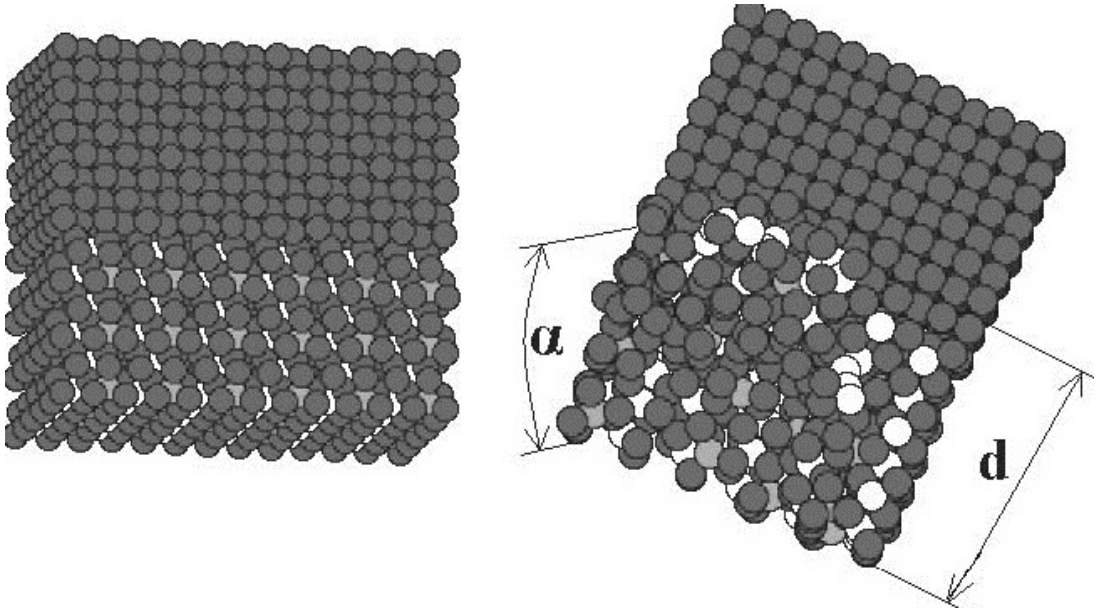
Таким образом, относительно параметра решетки, а $d = (0{,}83–8{,}36)a$.

Для моделирования межзеренной границы в программе XMD используется команда "move", с помощью которой производится совмещение кристаллитов, участвующих в создании межзеренной гра-

ницы. Данная команда осуществляет внедрение двух кристаллитов друг в друга с энергией, зависящей от температуры. Данная энергия учитывает коротко- и дальнодействующие части потенциала межатомного взаимодействия кристаллитов, имитируя тем самым процесс создания конденсируемого состояния межзеренной границы. Таким образом, создается ее межзеренное строение определенной толщины *d*. Для примера на рис. 1, *а, б* показан процесс формирования межзеренной границы для γ-Fe и $Fe_3(CN)$. Поскольку α = 150°, то межфазная граница большеугловая.

Таблица 1 – Значения толщин межзеренных границ для α-Fe и FeS_2 в зависимости от температуры

T, К	300	400	500	600	700	800	900	1000
d, *Å*	2,39	2,6	3,06	3,7	4,67	6,97	10,81	24



а *б*

Рисунок 1 – Моделирование процесса формирования межзеренных границ γ-Fe-$Fe_3(CN)$ (Т=600 К): *а* – исходное состояние; *б* – конечное состояние (● – γ-Fe; ● – C; ● – N)

Литература

1. Диффузия атомов и ионов в твердых телах / Б.С. Бокштейн, А.Б. Ярославцев. – М.: МИСИС, 2005. – 362 с.

2. Обобщенная решеточная модель и ее применение к прогнозированию термодинамических свойств многокомпонентных растворов / А.Ю.Захаров, А.Л.Удовский // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 1. – С. 5–14.

Манохін А.С., Клименко С.А., Копєйкіна М.Ю.,
Чумак А.О. Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ В ЗОНІ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТАМИ З ПНТМ НА ОСНОВІ cBN

Відповідно до стандарту ISO 513-2012, для обробки виробів з Fe-C-сплавів високої твердості використовуються різальні інструменти, оснащені полікристалічними надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору груп BH (вміст cBN 70–95%) і BL (вміст cBN 40–65%). Ці композити мають суттєво відмінні фізико-механічні властивості та умови використання. Тому розглянуті особливості контактної взаємодії в зоні різання при їх використанні.

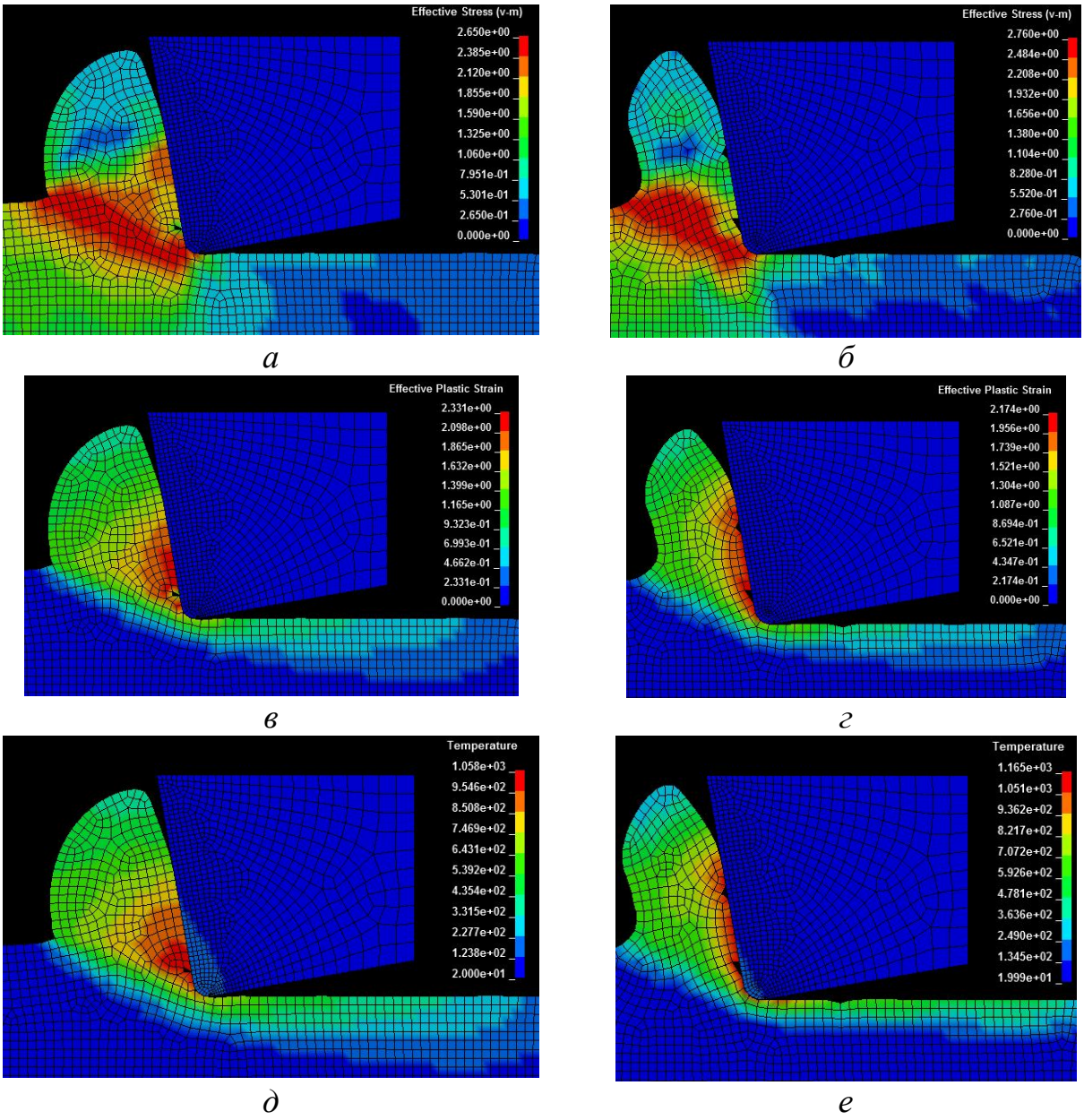
Експерименти з обробки загартованої сталі ШХ15 проводилися при поздовжньому точінні різцем з круглої пластиною діаметром 7 мм (композити: BH – cBN 97%, BL – cBN 55%) без фаски з подачею 0,19 мм / об і глибиною різання 0,2 мм, що відповідає середній товщині і ширині зрізу 0,03 мм і 1,3 мм відповідно.

В табл. 1 представлені значення сил різання, отримані при різання стали ШХ15 інструментами типів BH-cBN і BL-cBN. При точінні різцем, оснащеним BH-cBN, сила P_z дещо вища, ніж при використанні інструменту з низьким вмістом надтвердої фази – 212 і 185 Н відповідно. При цьому потрібно зазначити, що при дворазовому збільшенні швидкості різання з 100 до 200 м/хв. слід було очікувати істотно більш значного зниження величини P_z, в порівнянні зі спостережуваним. Зазначене пов'язане з тим, що для BL-cBN характерно більш інтенсивне фрикційне взаємодія на контактних ділянках інструменту – коефіцієнт тертя для такого інструменту при більшій швидкості різання мало відрізняється від коефіцієнту тертя в зоні контакту «BH-cBN-оброблюваний матеріал» при v = 100 м/хв. (μ = 0,22 і 0,28 відповідно).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика параметрів процесу обробки із застосуванням в інструменті ПНТМ різних груп

Параметр	BH-cBN, v = 100 м/мин / BL-cBN, v = 200 м/мин
P_z, Н	195 / 170
P_y, Н	267 / 200
ζ	2,85 / 2,60

На рис. 1, *а, б* представлений розподіл еквівалентних напружень (по Мізесу) в об`ємі оброблюваної заготовки в момент часу після врізання і початку сталого різання (t = 0,07 мс) при точінні інструментами двох типів. Рівень напружень в зоні зсуву в умовах обробки, притаманних для ВН-cBN, знаходиться в межах $\sigma_{v\text{-}m}$ = 2,40–2,65 ГПа. У разі, якщо різання здійснюється інструментом, оснащеним BL-cBN, спостерігається істотне зниження еквівалентних напружень в зоні первинної деформації $\sigma_{v\text{-}m}$ = 2,05–2,20 ГПа.



а *б*

в *г*

д *е*

Рисунок 1 – Розподіл еквівалентних (по Мизесу) напружень (*а, б*), ступінь деформації оброблюваного матеріалу (*в, г*), розподіл температурних полів (*д, е*) при обробці інструментами з композитами: *а, в, д* – ВН-cBN; *б, г, е* – BL-cBN

Усадка в умовах плоско-деформованого стану, близького до того, який виникає при значному співвідношенні ширини зрізу до товщини

стружки, оцінювалася по її товщині по нормалі до поверхні різця в точці на середині передньої поверхні – для інструменту типу BH-CBN усадка стружки $\zeta = 2{,}8$, для BL-cBN усадка стружки дещо менше і дорівнює $\zeta = 2{,}4$.

Загальна закономірність, що виражається в зниженні параметрів напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу при застосуванні композитів BL-cBN характерна і для величини ступеня пластичної деформації (рис. 1, *в, г*). Максимальні значення цього параметра спостерігаються в зоні, прилеглій до леза різця з боку його передньої поверхні. Для інструменту з високим вмістом надтвердої фази в цій зоні $\varepsilon_{ef} = 2{,}10–2{,}33$, а для композиту BL-cBN $\varepsilon_{ef} = 1{,}96–2{,}17$. У зоні зсуву ε_{ef} досягає значень 1,20–1,75 і 1,00–1,50 відповідно. Зниження ступеня деформації супроводжується деяким зниженням роботи деформації, і, як наслідок, тепловиділення.

Як можна припустити, описані вище значення сил різання і параметри напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу, характерні для умов використання різних типів надтвердих композитів корелюють з величиною температурного навантаження в зоні обробки. На рис. 1, *д, е* показані температурні поля, розраховані для випадків застосування BH-cBN і BL-cBN композитів. Величина температури в приконтактної зоні стружки в умовах точіння із швидкістю v = 100 м/хв. із застосуванням BH-cBN досягає значенні 950–1050 ° С. З переходом в діапазон більш високих швидкостей різання (v = 200 м/хв.), які доцільно застосовувати в разі використання композитів BL-cBN, температура в зоні контакту зростає до 1050–1160 °С.

Мирзаева Г.С., Абдуллаева М.А. Ферганский политехнический институт, Фергана, Узбекистан

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РЕМОНТЕ И ОБСЛУЖИВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ПЕРЕВАЛЕ «КАМЧИК»

В последние годы в Узбекистане большое внимание уделяется строительству качественных дорог, ремонту и обслуживании их, в том числе в горных местностях.

В рамках дальнейшего развития дорог и дорожно-транспортной инфраструктуры регионального и местного значения в Республике запланировано строительство и реконструкция 1700 км автомобильных дорог общего пользования. Также намечен капитальный и текущий ремонт 10400 км межхозяйственных сельских автомобильных дорог, дорожного покрытия улиц городов, районных центров, городских поселков и сельских населенных пунктов.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость уделять особое внимание вопросам охраны труда и технике безопасности при строительстве и ремонте автомобильных дорог в горных местностях. Безопасность работ при строительстве, ремонте и обслуживании автомобильных дорог на перевале «Камчик» достигается при выполнении всех технологических процессов, при подготовке мест работ, обеспечении безотказной работы всех машин, механизмов и оборудования.

В предупреждении случаев производственного травматизма важное значение имеет повышение личной и коллективной ответственности бригадиров и членов бригад за соблюдение требований безопасности труда. Решающим условием предотвращение производственного травматизма является рациональная организация труда, внедрение механизации производственных процессов, необходимые санитарно-бытовые условия для рабочих.

Как известно, строительство дорог состоит из комплекса технологических процессов, включающих расчистку трассы, возведение полотна, оснований и покрытий из гравия.

Работу по строительству автомобильных дорог особенно в горных местностях можно начинать только после получения утвержденной проектной документации — проекта организации строительства (ПОС) и проекта производства работ (ППР).

Ведущая проектная организация, составляющая проектное задание, разрабатывает проектные решения и по охране труда в проекте организации строительства. Разрабатываются проектные решения по охране труда, где указаны технические решения по безопасному производству работ в любое время года, санитарно-гигиеническому обслуживанию работающих, освещенности мест производства работ, пожарной безопасности.

Целесообразно выполнение тяжелой физической работы на открытом воздухе в жаркие дни проводить в прохладное время суток, а в часы максимальной положительной температуры дня рекомен-

дуется делать перерывы. Рабочие должны пользоваться специальной одеждой и специальной обувью, а также специальными защитными средствами.

На месте работ в каждой строительной бригаде должна находиться аптечка с наставлением по оказанию первой медицинской помощи. Все работающие должны быть обучены правилам и приемам оказания первой доврачебной медицинской помощи.

Инженерно-технические работники, ответственные за безопасное проведение работ, при назначении на работу должны проходить проверку требований безопасности труда и безопасной эксплуатации транспортных средств, дорожно-строительных машин, пожарной безопасности и производственной санитарии в соответствии с их должностными обязанностями.

Строительство, ремонт и эксплуатация (содержание) автомобильных дорог на перевале «Камчик», как известно, проводится в условиях интенсивного движения, что связано с большим риском. Предупреждение несчастных случаев возможно путем устройства объездов, установки ограждений и предупредительных дорожных знаков.

Ограждение мест работ и расстановка дорожных знаков при реконструкции, ремонте и обслуживании автомобильных дорог на перевале «Камчик», рекомендуется производить в соответствии с «Инструкцией по организации движения и ограждению мест производства дорожных работ»

До начала дорожных работ организация, производящая работы, обязана согласовать с заказчиком схемы ограждения мест работ и расстановки дорожных знаков с учетом местных условий. В схемах указываются виды работ и сроки их выполнения.

Работы по устранению отдельных повреждений дороги и дорожных сооружений, нарушающих безопасность движения, производятся без предварительного согласования и утверждения схем, но с обязательным извещением органов ГАИ о времени, месте и виде работ.

На границах участков дорожных работ необходимо устанавливать информационные щиты, на которых указывают организацию, проводящую работы, фамилию ответственного лица, руководящего работами и номер его служебного телефона.

Запрещается размещать на проезжей части и обочинах дороги дорожные машины, материалы для ремонта, инвентарь до полного обустройства ремонтируемого участка временными знаками и ограждениями.

До начала дорожных работ водители дорожных машин и рабочие должны быть проинструктированы о порядке движения, маневрирования, местах разворота, местах складирования материалов. Дорожные ямы, траншеи, должны быть ограждены заборами (щитами) и сигнальными фонарями, зажигаемыми с наступлением темноты и в туман.

Рекомендуется при осмотре участка дороги дорожный рабочий обязательно спецодежда светоотражателями должен идти по обочине навстречу движению транспортных средств. При остановках он устанавливает перед собой днем — предупредительный знак, а при плохой видимости — красный фонарь.

При выполнении ремонтных работ автомобильных дорог на перевале «Камчик» целесообразно применять временные дорожные знаки, ограждения и другие технические средства, к которым относятся конуса, сигнальные шнуры, сигнальные фонари и др. Под временными дорожными знаками следует понимать те знаки, которые устанавливают только на время проведения дорожных работ. Порядок расстановки знаков ограждающих и направляющих осуществляться с конца участка, наиболее удаленного от места производства работ. Вначале устанавливают дорожные знаки, затем ограждающие и направляющие устройства.

При зимнем содержании автомобильных дорог на перевале «Камчик» работающим, необходимо обеспечивать помещениями для обогрева, приема пищи, отдыха. В этих помещениях должны быть установлены сушилки для просушивания одежды и обуви.

При расчистке от снегодорожных участков на перевале, следует выбрать такую дальность отбрасывания снега, чтобы он не заваливал проходы и проезды.

При проведении снегоочистительных работ на перевале, когда подъемы и уклоны более 10°, следует надевать цепи противоскольжения на ведущие колеса снегоуборочных машин.

Песок или шлак, используемые для посыпки покрытий дорог в гололедицу, особенно на уклонах или подъемах, должны быть в сыпучем состоянии.

Материалы для ремонта дороги можно складывать только на обочине или обрезе, примыкающем к ремонтируемой стороне дороги. Перед штабелем материала на расстоянии около 10 м следует установить барьер переносного типа и повесить на него предупреждающий знак «Ремонтные работы».

При строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог, необходимо предусматривать водоотводные и нагорные канавы, обеспечение действенных мер по охране почвы и водоемов от попадания загрязненных вод, горюче-смазочных материалов и их отходов.

При строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог на перевале «Камчик»,основными источниками опасных и вредных факторов являются: движущиеся дорожно-строительные машины и механизмы; подземные коммуникации (электрокабели, газопроводы, кабели связи и др.); шум, вибрация машин и оборудования; вредные вещества, содержащиеся в выхлопных газах машин; возможное опрокидывание машин с насыпей и др.

Необходимо уделять особое внимание возведению дорожного полотна в горной местности, где возможны оползни, селевые потоки и обрушение грунта. Опасные места должны быть ограждены и снабжены соответствующими предупредительными и запрещающими знаками и надписями. Допуск к работам на таких участках разрешается только после ежедневного осмотра их ответственными лицами.

При возведении дорожного полотна разработка грунта, его транспортирование, уплотнение и планировка производятся механизированными комплексами и должны выполняться в строгом соответствии с проектом производства работ. Перед началом работ необходимо проверить исправность машин и механизмов.

Движение и остановка машин и другой техники около траншей и котлованов разрешаются только за пределами призмы обрушения данного грунта.

При установке и передвижении дорожных машин и механизмов, а также транспортных средств должны быть приняты меры, исключающие возможность их произвольного перемещения и опрокидывания под действием силы тяжести и внешних нагрузок.

Таким образом в резулбтате выполнения рекомендации для организации мероприятии по охране труда при строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог на перевале «Камчик», позволяет значительно сократить травматизм при строительстве и ремонте автомобильных дорог, уменьшит дорожно-транспортные происшествия. И повысить производительность труда и качество автомобильных дорог.

Насакина Е.О., Баикин А.С., Серегин А.В., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия,
Клименко С.А., Копейкина М.Ю. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина,
Хейфец М.Л. ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь

КИНЕТИКА РАСТВОРЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРНОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА В ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

Материалы с эффектом памяти формы являются наилучшими кандидатами для создания медицинских имплантатов, пластично деформируемых в охлажденном состоянии до крайне компактного вида, что способствует более легкой доставке до необходимого участка организма без полостного хирургического вмешательства, и самостоятельно принимающих функциональную форму в заданных эксплуатационных условиях без дополнительного воздействия [1–2]. Наиболее известным таким медицинским материалом является никелид титана, также наделенный механическими характеристиками, подобными поведению живых тканей, что помогает ему подстраиваться под физиологические нагрузки, обеспечивая необходимые условия эксплуатации [2–4]. Но сплав наделен и рядом недостатков: трудностью обработки при производстве изделий, высоким содержанием токсичного элемента, спорным уровнем биосовместимости и коррозионной стойкости [3–4].

В современном мире эффективным способом повышения эксплуатационных характеристик и устранения недостатков классических материалов является формирование на их основе композиционных материалов [5–9]. Данная работа посвящена долгосрочному исследованию коррозионной стойкости металлических слоистых композитов на основе никелида титана с поверхностными слоями из тантала или титана в средах, моделирующих физиологические, в статических условиях.

Исследовали проволоки диаметром 280 мкм и длиной 80 мм из наноструктурного никелида титана состава 55,91 мас.% Ni – 44,03 мас.% Ti и композитов на его основе с поверхностными слоями из тантала и титана, полученными с использованием метода магнетронного распыления в вакууме [10–12]: 1 – TiNi в исходном

состоянии, 2 – TiNi после отжига, 3 – TiNi после шлифовки, 4 – TiNi после шлифовки и отжига, 5 – TiNi-4 с поверхностным Ta слоем (Ta-TiNi), 6 – TiNi-4 с поверхностным Ti слоем (Ti-TiNi).

Проволоки в исходном состоянии для повышения качества поверхности подвергали последовательной шлифовке поверхности наждачной бумагой зернистостью от 180 до 1000 grit и конечной обработке пастой ГОИ до зеркальной поверхности. Уменьшение диаметра составляло до 10 мкм по сравнению с исходным. Для конечной стабилизации B2 фазы и придания формы проволоки в исходном состоянии или после шлифовки подвергали отжигу при 450 ^{o}C в течение 15 минут на воздухе. Диаметр проволоки не менялся.

Создание композитов проводилось с помощью магнетрона на постоянном токе (~860 мА) в газовой среде аргона при рабочем и остаточном давлении ~0,4 и 4×10^{-4} Па, соответственно, при напряжении ~ 400 В, дистанции напыления 15 см и времени распыления 80 мин на основную поверхность с вращением и по 30 мин на торцы после предварительного ионного травления.

Морфологию поверхности и послойный элементный состав исследовали на растровом электронном микроскопе LEO-430i Carl Zeiss, снабженном приставкой для микрорентгеноспектрального анализа, и Оже-спектрометре JAMP-9500F фирмы JEOL в сочетании с ионным травлением при бомбардировке аргоном под углом 30°.

Т.к. в человеческом организме pH меняется почти от 1 до 9 (например, 1,05 при язве 12–перстной кишки; 1,53–1,67 норма желудочного сока; 3,8–4 в пристеночной области кишечника; 7,34–7,43 норма крови; 8,5–9 в толстом кишечнике и т.д.), то и испытания решено было проводить при нескольких значениях pH. Были подобраны соответствующие стандартные буферные растворы с pH 1,68, 3,56, 4,01 и 9,18, «природный» 0,9 масс.% раствор хлорида натрия, а также искусственные плазма и слюна. Испытания проводили при 21 и 37 ^{o}C. Анализ проб проводился на последовательном атомно–эмиссионном спектрометре с индукционной плазмой.

Не обнаружено коррозии у всех образцов в щелочной среде, искусственных плазме и слюне, а также композитов и образцов после шлифовки в растворах с кислотностью 3,56–6,31 за 2 года исследования. Наибольшая концентрация металлов наблюдается в самом кислом растворе, меньшая в физрастворе. Концентрация металлов в растворе со временем возрастает, но наблюдается значительное затормаживание выхода металлических ионов в среду со временем,

причем оно происходит независимо от температуры испытаний, хотя начальный выход ионов при большей температуре выше.

Шлифовка поверхности приводит к образованию равномерного оксидного титанового слоя толщиной порядка 20 нм. Отжиг, следующий за ней и способствующий утолщению слоя до 150 нм, но приводящий к его неонородности, повышает стойкость материала на начальном периоде исследований, но при длительных испытаниях уступает механической обработке поверхности.

Литература

1. Эффекты памяти формы и их применение в медицине / В.Э. Гюнтер, В.И. Итин, Л.А. Монасевич и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. – 742 с.

2. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения. / В.О. Гюнтер, В.Н. Ходоренко, Ю.Ф. Ясенчук, Т.Л. Чекалкин. – Томск: Изд–во МИЦ, 2006. – 296 с.

3. Методы исследования и повышения коррозионной стойкости медицинского сплава с эффектом памяти формы NiTi. Исследование коррозионной стойкости и биосовместимости нитинола / Е.О. Насакина, М.А. Севостьянов, Б.А. Гончаренко и др. // Перспективные материалы. – 2014. – № 7. – С. 37–49.

4. Методы исследования и повышения коррозионной стойкости медицинского сплава с эффектом памяти формы NiTi . Способы изменения коррозионной стойкости нитинола / Е.О. Насакина, М.А. Севостьянов, Б.А. Гончаренко и др. // Перспективные материалы. – 2014. – № 9. – С. 19–33.

5. Stolin A.M., Bazhin P.M. Manufacture of Multipurpose Composite and Ceramic Materials in the Combustion Regime and High-temperature Deformation (SHS Extrusion) // Theor. Found. Chem. En+. – 2014. –V. 48, №. 6. – P. 751–763.

6. Bazhin P.M., Stolin A.M., Alymov M.I. Preparation of Nanostructured Composite Ceramic Materials and Products under Conditions of a Combination of Combustion and High-temperature Deformation (SHS Extrusion) // Nanotechnologies in Russia.– 2014.–V. 9, № 11–12.– P. 583–600.

7. Бажин П.М., Столин А.М., Титов Н.В. Композиционные защитные покрытия на основе TiC-W2C-Co, полученные электродуговой наплавкой СВС-электродами на деталях сельскохозяйственной техники // Композиты и наноструктуры. – 2015. – т. 7, № 4. – С. 2–9.

8. Бажин П.М., Столин П.А., Столин А.М., Аверичев А.О. Особенности микроструктуры наплавленного слоя, полученного СВС-

электродами на основе Ti-Al-C // Упрочняющ. технологии и покрытия. – 2016. – № 1. – С. 20–24.

9. Mesoporous Fe-alumina films prepared via sol–gel route / P.V. Krivoshapkin., V.I. Mikhaylov, E.F. Krivoshapkina, et all. // Microporous and Mesoporous Materials. – 2015. – № 204. – P. 276–281.

10. Долгосрочные коррозионные испытания наноструктурного нитинола состава (Ni – 55,91% (мас.), Ti – 44,03% (мас.)) в статических условиях. Состав и структура до и после коррозии / Е.О. Насакина, М.А. Севостьянов, М.А. Гольдберг и др. // Материаловедение. – 2014. – № 8. – С.40–46.

11. Долгосрочные коррозионные испытания наноструктурного нитинола состава (Ni – 55,91% (мас.), Ti – 44,03% (мас.)) в статических условиях. Выход ионов / Е.О. Насакина, М.А. Севостьянов, М.А. Гольдберг и др. // Материаловедение. – 2014. – № 9. – С. 30–37.

12. Получение наноструктурного композиционного материала с эффектом памяти формы для биомедицинских изделий / Е.О. Насакина, М.А. Севостьянов, А.Б. Михайлова и др. // Неорган. материалы. – 2015. – т. 51, № 4. – С. 453–457.

Работа выполнена при поддержке программы РФФИ № 15-33-70006 «мол_а_мос» и 14-29-10208 «офи_м».

Неверов А.Н., Сергеев И.Д. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В АКУСТИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ

В работе [1] получено выражение, связывающее силу F, сжимающую шероховатые поверхности, с их сближением u:

$$F(u) = ESb\nu H_{\max}^{-(n+\nu+1)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u^{n+\nu+1}}{(n+\nu)(n+\nu+1)}, \qquad (1)$$

где E – эффективный модуль упругости, S – номинальная площадь контакта, b и ν – эффективные параметры опорной кривой контакта, $H_{\max} = H_{\max 1} + H_{\max 2}$, $H_{\max 1}$ и $H_{\max 2}$. – наибольшие высоты профилей поверхностей контакта.

Видно, что эта зависимость нелинейна. По этой причине при гармоническом воздействии на контакт он должен стать генератором высших гармоник.

Когда заданы статическая сжимающая сила P_0 и закон колебаний:

$$u_{\sim} = u_m \cos \omega t, \tag{2}$$

где $u_{\sim}$ – текущее синусоидальное смещение в контакте в момент времени t, u_m – амплитуда колебательного смещения в нем, ω – круговая частота колебаний, смещение в контакте u будет представлять собой сумму статического смещения u_0 и синусоидальных колебаний с частотами $n\omega$ (n = 1,2,3…) и амплитудами u_n. В [2] получены выражения для постоянной составляющей F_0 и амплитуд 1-5 гармоник силы, действующей в контакте $F_{1\text{-}5}$:

$$F_0 = \frac{ESb}{\nu+1}\varepsilon_0^{\nu+1}\left(1+\frac{\nu(\nu+1)}{4}\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0}\right)^2\left(1+\frac{(\nu-1)(\nu-2)}{16}\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0}\right)^2(1+...)\right)\right), \tag{3}$$

$$F_1 = ESb\varepsilon_0^{\nu}\varepsilon_m\left(1+\frac{\nu(\nu-1)}{8}\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0}\right)^2\left(1+\frac{(\nu-2)(\nu-3)}{8}\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0}\right)^2(1+...)\right)\right), \tag{4}$$

$$F_2 = ESb\frac{\nu}{4}\varepsilon_0^{\nu-1}\varepsilon_m^2\left(1+\frac{(\nu-1)(\nu-2)}{16}\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0}\right)^2(1+...)\right), \tag{5}$$

$$F_3 = ESb\frac{\nu(\nu-1)}{24}\varepsilon_0^{\nu-2}\varepsilon_m^3\left(1+\frac{(\nu-2)(\nu-3)}{16}\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0}\right)^2(1+...)\right), \tag{6}$$

$$F_4 = ESb\frac{\nu(\nu-1)(\nu-2)}{192}\varepsilon_0^{\nu-3}\varepsilon_m^4 + ..., \tag{7}$$

$$F_5 = ESb\frac{\nu(\nu-1)(\nu-2)(\nu-3)}{384}\varepsilon_0^{\nu-4}\varepsilon_m^5 + ... \tag{8}$$

При $\varepsilon_m = 0$ постоянная составляющая силы F_0 равна статической силе P_0. Тогда, ограничиваясь в (3) первым членом разложения, получаем:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{P_0(\nu+1)}{ESb}\right)^{\frac{1}{\nu+1}}. \tag{9}$$

Учитывая только первое слагаемое формулы (4), получаем связь между относительным смещением в контакте ε_m и первой гармоникой действующей силы F_1:

$$\varepsilon_m = \frac{F_1}{ESb}\left(\frac{ESb}{(\nu+1)P_0}\right)^{\frac{\nu}{\nu+1}}. \qquad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в уравнения (5)–(8), получаем для амплитуды *n*–й гармоники (*n* = 2 – 5):

$$F_2 = \frac{\nu}{4(\nu+1)}\frac{F_1}{P_0}F_1;$$

$$F_3 = \frac{\nu(\nu-1)}{24(\nu+1)^2}\left(\frac{F_1}{P_0}\right)^2 F_1;$$

$$F_4 = \frac{\nu(\nu-1)(\nu-2)}{192(\nu+1)^3}\left(\frac{F_1}{P_0}\right)^3 F_1;$$

$$F_4 = \frac{\nu(\nu-1)(\nu-2)(\nu-3)}{1920(\nu+1)^4}\left(\frac{F_1}{P_0}\right)^4 F_1;$$

.....

$$F_n = \frac{\Gamma(\nu+1)}{2^{n-1}(\nu+1)^{n-1}\Gamma(n+1)\Gamma(\nu-n)}\left(\frac{F_1}{P_0}\right)^{n-1}F_1 = \frac{1}{\mathrm{B}(n+1,\nu-n)}\left(\frac{F_1}{2(\nu+1)P_0}\right)^{n-1}F_1,$$

где $B(n+1,\nu-n)$ – бета–функция, $\Gamma(n+1),\Gamma(\nu-n),\Gamma(\nu+1)$ – гамма–функции от соответствующих аргументов.

Зная амплитуды гармоник возбуждающей силы $F_{2\text{-}5}$, можно подсчитать отклик системы на гармоническое воздействие (2). Величина этого отклика характеризует степень несовершенства акустического контакта.

Литература

1. Гусев В.И., Неверов А.Н. Стержневая модель плоского акустического контакта. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте:/ Мат. 16-й международ. науч.-техн. семинара, 22–26.02.2016 г., г. Свалява. – К.: АТМ Украины, 2016. – С. 61–64.

2. Неверов А.Н., Сергеев И.Д. Гармоническое воздействие на акустический контакт. Генерация высших гармоник. // Инженерия поверхности и реновация изделий: Мат. 16-й международ. науч.-техн. конф., 30.05–3.06.2016 г., г. Одесса. – К.: АТМ Украины, 2016. – С. 113–115.

Нигметзянов Р.И., Сидоренко А., Сундуков С.К.
Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет, Москва, Россия

ДИНАМИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО НАКЛЕПА СВОБОДНЫМ ДЕФОРМИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Ультразвуковая обработка является одним из наиболее эффективных способов поверхностного пластического деформирования (ППД). Основными преимуществами способов ППД являются: образование наклепанного слоя, возникновение остаточных напряжения сжатия, снижение шероховатости и повышение микротвердости поверхности.

При обработке деталей, имеющих большую поверхность с малым радиусом кривизны, используется поверхностное пластическое деформирование индентором, находящимся в зазоре между рабочим инструментом колебательной системы и обрабатываемой поверхностью. В этом случае воздействие осуществляется путем передачи импульса деформирующим элементом, полученным при соударении его с торцом ультразвуковой колебательной системы, а затем с обрабатываемой поверхностью.

При упрочнении свободным деформирующим элементом частота ударов существенно меньше частоты ультразвука, причем одним из основных факторов, определяющих периодичность воздействия индентора на обрабатываемую поверхность, является статическое усилие прижима.

Экспериментальные исследования с помощью скоростной кинокамеры характера импульсного наклепа в режиме ультразвуковой обработки свободным деформирующим элементом позволили изучить динамику перемещения индентора. Киносъемка процесса ультразвукового упрочнения проводилась с помощью скоростной кинокамеры со скоростями съемки 2–6,5 тыс. кадров/с.

В экспериментах использовалась ультразвуковая колебательная система с рабочей частотой 21,2 кГц при амплитуде колебательных смещений излучателя ξ_m = 20 мкм.

В результате анализа кинокадров было найдено, что при усилии прижима 5 Н среднее время между двумя последовательными моментами контакта деформирующего тела (шарика) с обрабатываемой поверхностью составляет $1{,}8 \cdot 10^{-3}$ с, что соответствует частоте ударов

порядка 550 Гц. Как показали экспериментальные исследования, при соударении с обрабатываемой поверхностью происходит неупругий удар, а скорость шарика в момент соударения с излучателем существенно меньше амплитуды колебательной скорости излучателя.

При увеличении усилия прижима увеличивается частота ударов индентора, а амплитуда уменьшается. При увеличении усилия прижима до 50 Н частота ударов возрастает до 1400 Гц, а амплитуда составляет 12–18 мкм (рис. 1).

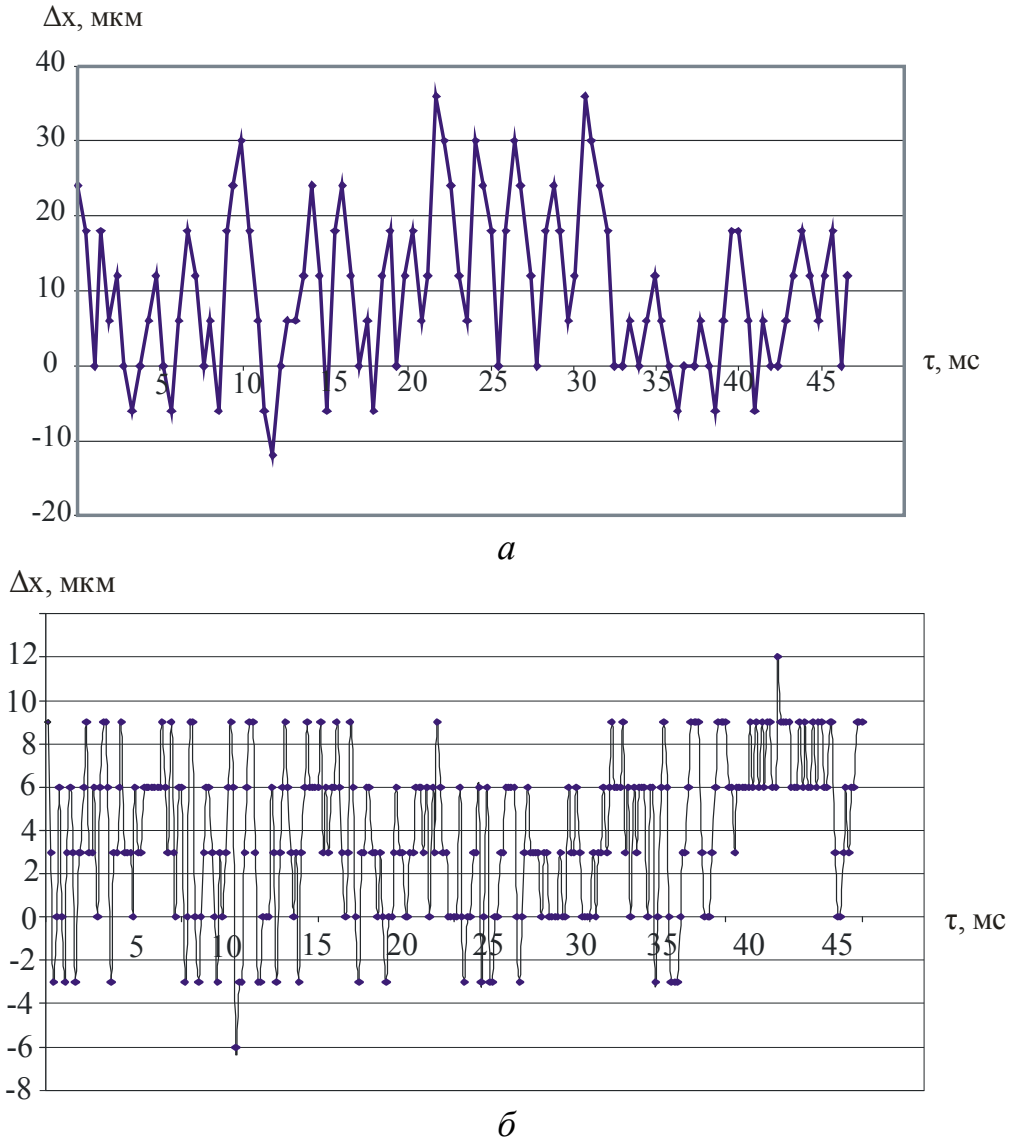


Рисунок 1 – Динамика изменения положения шарика Δ*x*, мкм при усилии прижима: *а* – 5 Н; *б* – 50 Н

Для определения максимального значения силы воздействия индентора в случае периодического контакта найдена зависимость:

$$F_{\max} \approx \sqrt[3]{\frac{\alpha}{2}(F_H N)^2 \xi_m} \ .$$

где N – число периодов ультразвуковых колебаний между контактами шарика и деформируемой поверхности; F_H – усилие прижима; ξ_m – амплитуда колебаний излучателя; α – коэффициент, определяемый свойствами металла.

На основании исследования динамики ультразвукового наклепа свободным деформирующим элементом установлена зависимость между усилием статического прижима и частотой ударов деформирующего элемента. Полученные результаты позволяют определить рациональные режимы ультразвукового наклепа различных материалов.

Николайчук В.Я. Винницкий национальный аграрный университет, Винница,
Лопата В.Н. НТУ Украины «Киевский политехнический институт», Киев,
Черновол М.И., Соловых Е.К. Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, Украина
Дудан А.В. Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr-C-Si-Ni

Актуальной задачей современного материаловедения является повышение уровня функциональных свойств покрытий из порошковых материалов на основе Fe и Ni**,** главной особенностью которых является самофлюсуемость, что позволяет обходиться без специальных защитных сред и флюсов Повысить качество и свойства покрытий из этих порошков возможно путем изменения их состава или технологии нанесения. Получить износостойкие покрытия из порошковых материалов системы Fe-Cr-C-Si-Ni можно путем использования метода электроконтактного припекания (ЭКП) [1-2]. Исследованиям электроконтактных методов нанесения покрытий посвящены разработки ученых в области контактной сварки, наплавки, наварки и припекания: Рыкалина Н.Н., Гельмана А.С., Клименко Ю.В., Поляченко А.В., Дорожкина Н.Н, Верещагина В.А.,

Жорника В.И. [1]. Однако, в работах по ЭКП отсутствуют систематические исследования структуры, состава и свойств покрытий из порошков системы Fe-Cr-C-Si-Ni во взаимосвязи с параметров процесса, то есть отсутствует материаловедческий аспект.

Цель наших исследований – это создание износостойких высокопрочных покрытий из порошковых материалов системы Fe-Cr-C-Si-Ni электроконтактным припеканием за счет установления взаимосвязи технологических параметров ЭКП со структурой, составом и свойствами покрытий.

Научно-технологической основой выбора материала покрытия являлось: с одной стороны, установление физико-химической согласованности в системе «покрытие-основа»; с другой – установление взаимосвязи в системе «технология-состав-структура-свойства». В том случае, когда состав материала для покрытия задан, на первый план выходят три основных критерия: 1) энергонасыщенность; формуемость порошкового материала; 3) оптимальные режимы процесса получения покрытия, формирующие его структурно-фазовое состояние, которые обеспечивает заданные функциональные свойства изделия.

В исследованиях использовался порошок ПГ-С1**,** в том числе с износостойкими добавками, в частности, с порошком феррохрома углеродистого - ФХ-800. Химический состав порошка ПГ-С1 ГОСТ 21448-75: Fe – основа; Cr – 28,7%; C – 3,17%; Si – 3,2%; Mn – 0,7%; Ni – 3,5%; P – 0,04%; S – 0,04%.

Процесс формирования покрытий при ЭКПП включает:

1) формование (уплотнение порошкового слоя) под давлением $P \geq$ 10 МПа при температурах от $T_{ком}$ до 0,1–0,2 $T_{пл}$;

2) спекание под давлением $P \geq$ 20–40 МПа при пропускании электрического тока $T \leq 0{,}6–0{,}8T_{пл}$;

3) припекание спеченного порошкового слоя к основе при $P \geq$ 40–100 МПа и $T \leq 0{,}8\text{-}0{,}9T_{пл}$**.**

Высокая прочность сцепления покрытий $\sigma_{сц.}$ с основой (180–220 МПа) обеспечивалась за счет образованием со стороны основы диффузионной зоны толщиной до 0,02 мм за счет диффузии никеля Ni и хрома Cr в основу**.** При этом глубина диффузии хрома Cr в основу (15 мкм) вдвое превышает глубину диффузии никеля Ni (7 мкм), что связано с образованием неограниченных твердых растворов в системе Fe-Cr. На границе покрытие - деталь не имеет места наличие жидкой фазы**.** Это свидетельствует о том, что при ЭКПП не имеет место перегрев и зона перемешивания материала покрытия

с металлом детали. Рентгенографическое изучение фазового состава покрытия из порошка ПГ-С1, показывает, что при оптимальных режимах ЭКПП в спеченном слое сохраняются карбиды Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$ присутствующие в исходном порошке, что свидетельствует о сохранении наследственных свойств материала покрытия при ЭКП. Покрытие, полученное ЭКП порошка ПГ-С1 (заэвтектическое) состоит из равномерной карбидной эвтектики и твердого раствора**.** Структура частиц порошка ПГ-С1 состоит из карбидов, раствора углерода и легирующих элементов в α- и γ-железе, и незначительно легированного мартенсита и продуктов его распада.

Особенности структурообразования покрытий при ЭКП порошка ПГ-С1 с добавками ФХ-800 заключаются в следующем. Высокая скорость нагрева и охлаждения при приложении давления к слою порошка приводит к растрескиванию карбидных частиц (рис. 1).

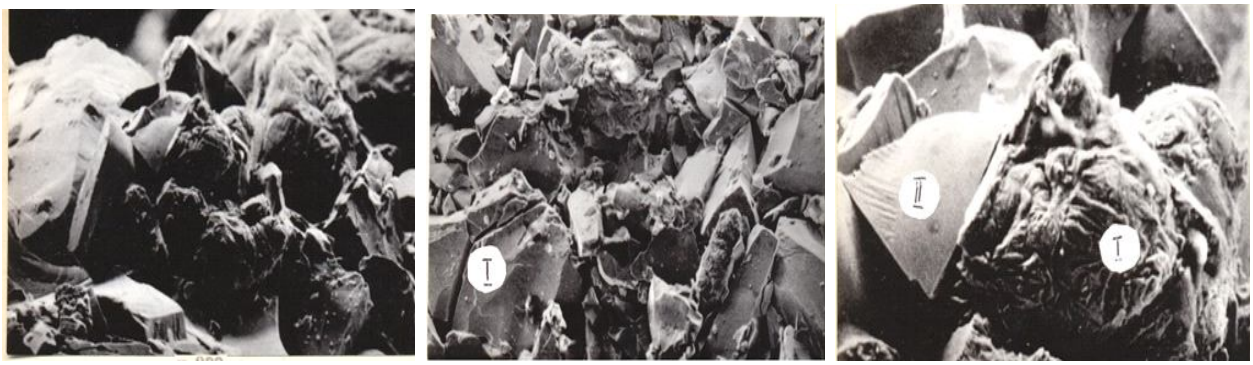
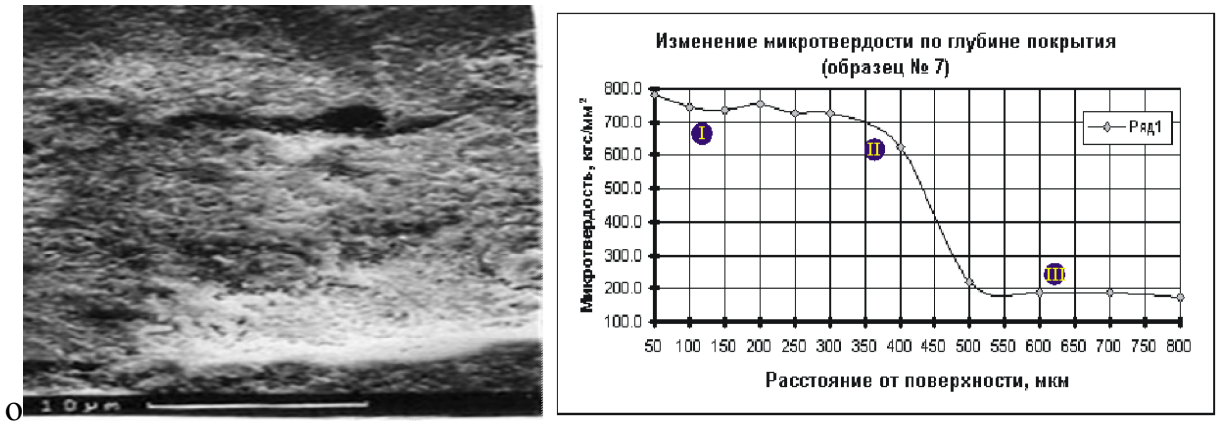


Рисунок 1 – Фрактограмма покрытия (×500), полученного ЭКПП шихты из 60%ПГ-С1 и 40%ФХ-800 (1-участок разрушения частиц ФХ-800)

Наиболее интенсивно растворяются мелкие карбиды (размером менее 0,2 мм). Эффект измельчения карбидной фазы позволяет получать спеченные слои с равномерно распределенными карбидными включениями, что способствует увеличению износостойкости покрытий. Карбидные частицы имеют специфическую остроугольную форму **(**рис. 1**)**, что свидетельствует о сохранении исходных свойств и структуры материала покрытия при ЭКП. Таким образом, введение в состав покрытий из порошков ПГ-С1 феррохрома углеродистого ФХ-800 и импульсное температурно-силовое воздействие в процессе формирования покрытия, увеличивающее диспергирование частиц твердой фазы, способствую увеличению микротвердости**,** а, следовательно, и износостойкости покрытий**.** Наличие на границе «покрытие-основа» минимальной зоны термической влия-

ния (ЗТВ) до 1,8 мм (рис. 2, *а*) характеризуется изменением микротвердости (рис. 2, *б*).



а *б*

Рисунок 2 – Характеристика ЭКП ПР-С1+ФХ-800:
а – ЗТВ (×100); *б* – изменение микротвердости

Выводы. Импульсное температурно-силовое воздействие в процессе формирования покрытия при ЭКПП приводит к диспергированию частиц твердой фазы, что способствует увеличению микротвердости и износостойкости**.** Износостойкость полученных покрытий в 2,3–3,18 раза выше, чем стали 45, закаленной до твердости 46–48 HRC_3.

Литература

1. Предпосылки управления качеством формируемого покрытия и соединения его с деталью при электроконтактном припекании / В.Н. Корж, Л.А. Лопата, В.Я. Николайчук и др // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузове машинобудування, автоматизація: Зб. наук. праць / Кіровоградський національний технічничний університет (КНТУ). – Кіровоград, 2010 – Вип. 23. – С. 339–344.

2. Упрочнение никель-хромовых сплавов электроконтактным припеканием композиционных порошков системы (NiCr-Cr_3C_2). / Л.А. Лопата, В.Н. Корж, Ю.В. Волков, В.Я. Николайчук // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: Мат. 14-го Международ. науч.-техн. семинара, 26–28 февраля 2014 г., г. Свалява. – К.: АТМ Украины, 2014. – С. 139–141.

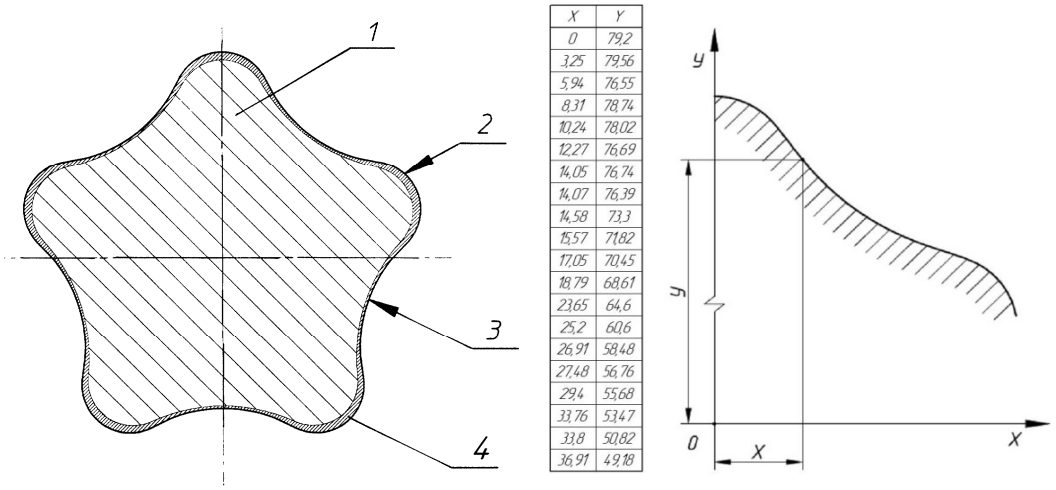
Овчинников В.С., Сивцев Н.С., Лукин Е.В.,
Шубина М.И. Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ РОТОРА ВИНТОВОГО ЗАБОЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Винтовые забойные двигатели (ВЗД) в настоящее время широко используются для бурения и капитального ремонта скважин. ВЗД – это объемный героторный гидравлический механизм, преобразующий давление нагнетаемой в полость статора жидкости во вращательное движение ротора (рис. 1). Вращающий момент от ротора передается на выходной вал и присоединенное к нему долото.

Рисунок 1 – Общий вид ВЗД

Ротор ВЗД представляет собой многозаходный винт с износостойким антикоррозионным покрытием и шагом зубьев, соизмеримым диаметру. В торцевом сечении (нормальном к оси вращения) профиль зубьев очерчен выпукло-вогнутыми циклоидальными кривыми (рис. 2).



X	Y
0	79,2
3,25	79,56
5,94	76,55
8,31	78,74
10,24	78,02
12,27	76,69
14,05	76,74
14,07	76,39
14,58	73,3
15,57	71,82
17,05	70,45
18,79	68,61
23,65	64,6
25,2	60,6
26,91	58,48
27,48	56,76
29,4	55,68
33,76	53,47
33,8	50,82
36,91	49,18

а *б*

Рисунок 2 – Торцевой профиль зубьев ротора ВЗД (*а*) и координаты точек профиля в прямоугольной системе координат (*б*):
1 – зуб ротора; 2, 3 – выступ и впадина зуба; 4 – износостойкое покрытие

Для финишной обработки винтовой поверхности ротора специалистами компании ООО «АТ-Систем» (г. Ижевск) разработан и введен в эксплуатацию первый отечественный специальный полуавтомат для ленточного шлифования роторов ВЗД (рис. 3) [1]. На базе полуавтомата опробован и внедрен способ полуавтоматического контроля профиля зубьев ротора ВЗД.

Рисунок 3 – Специальный полуавтомат для ленточного шлифования роторов ВЗД

Измерительным инструментом является рука HPRA фирмы RENISHAW с контактным датчиком RP3 и прямым щупом. Наличие на руке быстросъемного разъема позволяет быстро и с достаточной точностью монтировать руку на суппорте полуавтомата перпендикулярно оси вращения ротора (рис. 4).

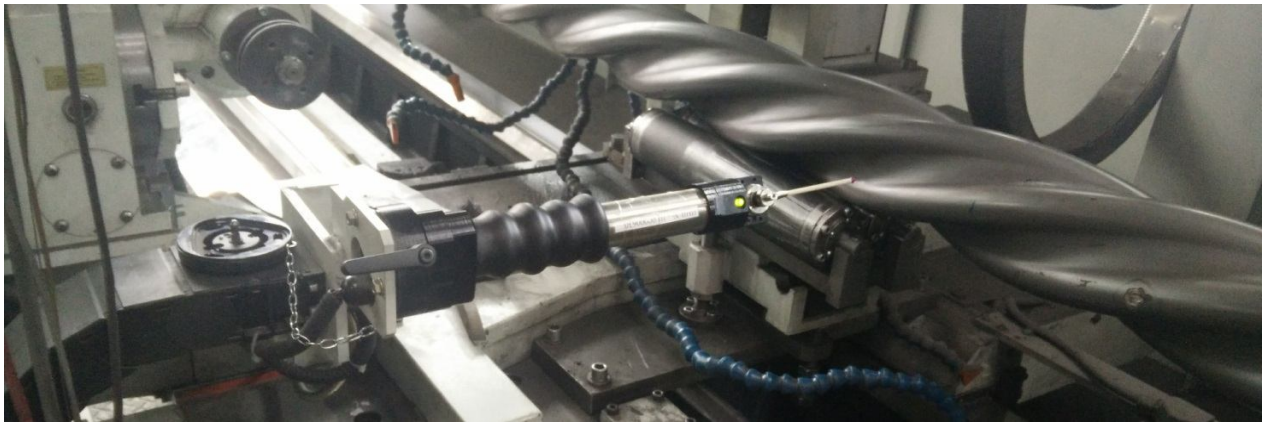


Рисунок 4 – Измерительная рука, смонтированная в суппорте полуавтомата

При измерении профиля зубьев используется полярная система координат. Перевод результатов измерения в декартовую систему координат (рис. 2, *б*) производится отдельно на персональном ком-

пьютере. Процесс полуавтоматического контроля профиля зубьев ротора включает четыре этапа.

1. Калибровка щупа после установки руки в суппорте для поиска нулевой точки отсчета по оси *X*. Щуп калибруется по вращающемуся центру 1 (рис. 5).

2. Перемещение суппорта измерительной руки к выбранному для измерения профиля зубьев торцевому сечению ротора. Количество и расположение сечений для измерения задается по программе. Все перемещения также осуществляются по программе.

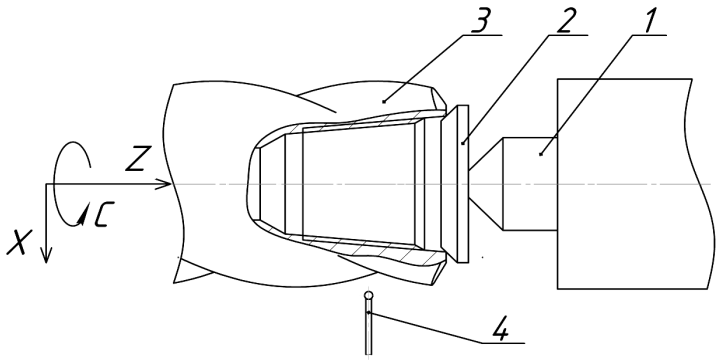


Рисунок 5 – Схема базирования ротора ВЗД при измерении профиля зуба:
1 – вращающийся центр; 2 – переходный конус; 3 – ротор; 4 – щуп

3. Поиск нулевой точки отсчета по угловой координате. Для ее поиска на станке по программе выполняются следующие действия:

- щуп перемещается по оси *X* во впадину между соседними зубьями;
- ротор поворачивается в направлении *C* до контакта с щупом;
- система ЧПУ запоминает угловую координату точки контакта щупа с ротором;
- щуп, перемещаясь по оси *X*, выходит из впадины между зубьями;
- ротор поворачивается в направлении *C* так, чтобы щуп оказался с обратной стороны зуба;
- щуп перемещается по оси *X* во впадину между зубьями;
- ротор поворачивается в обратном направлении *C* до контакта с щупом;
- система ЧПУ запоминает новую угловую координату точки контакта щупа с ротором;
- щуп, перемещаясь по оси *X*, выходит из впадины между зубьями;
- система ЧПУ рассчитывает разницу между первым и вторым значениями углов и определяет нулевую точку отсчета по угловой координате.

4. Измерение профиля зубьев. Ротор поворачивается в нулевую точку отсчета по угловой координате и запускается цикличный процесс измерения:

- щуп двигается к ротору до контакта с вершиной профиля зуба;

- система ЧПУ считывает координаты точки контакта;
- щуп выходит из контакта с ротором;
- ротор поворачивается на заданный угол и процесс повторяется.

Погрешность измерения рассчитывается аналитическим методом для каждой точки отдельно [2].

Применение описанного способа полуавтоматического контроля, позволяет измерять профиль зубьев роторов ВЗД, не используя отдельной координатно-измерительной машины.

Литература

1. Патент 164443 RU, МПК B24B19/00. Станок для финишной обработки винтовых поверхностей / О.А. Суглов, Е.В. Лукин, Д.Р. Габдулин и др. // – Бюл. – 2016. – № 24

2. Способ измерения профиля криволинейных поверхностей / В.С. Овчинников, Н.С. Сивцев, Е.В. Лукин // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Мат. 17-го международ. научн.-техн. семинара, 20–24 февраля 2017 г., г. Сваляв). – К. : АТМ Украины, 2017. – С. 195–198.

Поболь И.Л. Физико-технический институт
НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ МЕТОДОВ

Электронно-ионно-плазменные методы обработки металлов и сплавов в режимах переплава, поверхностного упрочнения, нанесения покрытий, получения соединений, совмещенных способов воздействия обеспечивают формирование новых структурно-фазовых состояний, упрочнение материалов и придание деталям из металлов и сплавов таких сочетаний свойств, которые сложно или невозможно получить иными методами металлургии, сварки, объемного и поверхностного упрочнения. Их можно использовать с большой эффективностью практически на всех предприятиях машиностроительного профиля. В ФТИ НАН Беларуси проводятся исследования,

разрабатываются технологии инженерии поверхности, получения сварных и паяных соединений.

Электронно-лучевые методы. Институт располагает современным комплексом автоматизированного электронно-лучевого (ЭЛ) оборудования с мощностью луча до 15 и 30 кВт и объемом рабочего пространства 3,5 $м^3$ и 40 $м^3$. Кроме оказания услуг предприятиям по сварке деталей, ведется поиск новых применений ЭЛС. Отработаны методы сварки нержавеющих сталей с высоким содержанием бора АТАВОR и 04Х14Т3Р1Ф-Ш (ЧС-82). Из них изготавливаются трубы для размещения в бассейнах выдержки отработавшего ядерного топлива, которое может безопасно длительное время хранится в стеллажах с уплотненным шагом расположения труб.

С использованием гидроударной штамповки и ЭЛС изготовлена серия одноячеечных сверхпроводящих ниобиевых 1,3 ГГц резонаторов, предназначенных для ускорителей элементарных частиц. Начаты разработка и создание сверхпроводящих резонаторов для ускорительного комплекса NICA/MPD в ОИЯИ.

Поверхностное ЭЛ упрочнение в режиме закалки с плотностью энергии 10^2-10^4 Вт/$см^2$ обеспечивает высокие скорости (10^3–10^5 °С/с) нагрева и самоохлаждения материала и приводит к дифференцированному упрочнению материала на глубину 0,1–2 мм, формированию в поверхностном слое новых структурных состояний. Твердость конструкционных, инструментальных и подшипниковых сталей достигает HRC 65-68, микротвердость – 10–11 ГПа.

Комбинированные и совмещенные ЭЛ методы инженерии поверхности связаны с нанесением на основу износо-, коррозионностойкого или антифрикционного материала, что обеспечивает получение комплекса высоких характеристик упрочненного изделия. Исследованы варианты одно- и многослойной ЭЛ наплавки, ЭЛ обработки различных типов предварительно осажденных покрытий (электродуговых**,** газотермических, электролитических, детонационных, слоев ХТО и др.) на сталях и титановых сплавах. ЭЛ обработка таких покрытий приводит к благоприятным структурным и фазовым превращениям в покрытии и основе, изменениям в свойствах осажденных слоев, релаксационным процессам в дефектном материале покрытия, формированию переходной диффузионной зоны, градиента свойств по сечению от основы к поверхности, повышению прочности сцепления и плотности покрытий, износо-, жаро- и коррозионной стойкости и других характеристик.

Опыт по формированию одно- и многослойных композиций путем последовательного ЭЛ нагрева и расплавления добавляемых материалов служит основой для создания новых методов аддитивных технологий. На ЭЛ оборудовании отрабатываются варианты послойного выращивания изделий из 3D моделей с использованием исходного материала в виде проволоки.

Технологии и оборудование ионной ХТО. Ионная ХТО (азотирование, цементация, нитроцементация) деталей из сталей, чугунов, титановых сплавов обеспечивают значительное (в 2–3 раза по сравнению с традиционной газовой ХТО) снижение энергозатрат и общей стоимости упрочнения. Независимое управление расходом каждого из компонентов рабочей газовой среды (азота, аргона, метана или ацетилена) и давлением в камере позволяют формировать на изделиях из разных марок сталей и сплавов титана азотированные слои заданного состава и глубины. Создаваемое в институте оборудование полностью автоматизированное. Особенности технологий - возможность управления химической активностью разряда в зависимости от марки обрабатываемого материала, площади упрочняемой садки и температуры процесса. Это обеспечивает серийную устойчивость технологии ионной ХТО, воспроизводимость результатов обработки независимо от степени загрузки камеры изделиями (садки деталей массой от килограммов до нескольких тонн, бездеформационной обработки деталей длиной до 3200 мм). Наше промышленное оборудование ионной ХТО успешно эксплуатируется на крупнейших предприятиях Беларуси и России.

Технологии и оборудование электролитно-плазменной обработки, электрохимического оксидирования, нанесения упрочняющих покрытий. Однослойные покрытия на деталях машин и инструменте в некоторых случаях исчерпали себя. Накоплен опыт разработки технологий и создания оборудования для осаждения многослойных многокомпонентных композиций, которые стабильно обеспечивают повышение стойкости изделий от 2 до 5 и более раз.

Изготавливаются медицинские имплантаты из сплавов титана с защитно-декоративными покрытиями толщиной 0,05–1,0 мкм, обладающими улучшенными медико-биологическими и эксплуатационными характеристиками.

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ № Т15УК/А-054

Поболь И.Л., Нмаду Д. Физико-технический
институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ СПЛАВОВ АД1 И АМГ2

Получение оксидных слоев на алюминиевых сплавах нашло достаточно широкое применение, как в традиционных областях авиа- и машиностроения, строительства, транспорта, электроники, так и в новых – создания солнечных батарей, инфракрасных излучателей, фильтров, сенсоров, наноматериалов и др. Используются различные варианты окисления: электрохимическое, в тлеющем разряде, анодное, микродуговое оксидирование, твердое анодирование, ионная имплантация. Нами, кроме указанных методов, применяется высоковольтное электрохимическое оксидирование (ВВЭО), мало изученное в литературе. Метод ВВЭО имеет ряд преимуществ перед другими вариантами получения оксидных слоев.

В работе исследованы закономерности формирования с применением ВВЭО комплекса характеристик наноструктурированных оксидных покрытий (микротвердости, износо- и коррозионной стойкости материала, морфологии и цвета поверхности, размера нанопор и плотности их размещения на поверхности) на сплавах АД1 (аналог сплава 1050) и АМг2 (аналог 5052). Использовано оборудование ВВЭО, созданное в институте. Опробованы несколько десятков вариантов электролитов, из которых для исследований отобраны четыре состава.

Установлено влияние плотности рабочего тока (в диапазоне 1–5 А/дм^2) на толщину оксидного слоя, для сплава АД1 растущего с 20 мкм при плотности 1 А/дм^2 до 58 мкм при 4 А/дм^2 с последующим снижением толщины до 52 мкм, что связано с протеканием конкурирующих процессов образования слоя и его разрушения. Для сплава АМг2 такого снижения не наблюдается, толщина слоя достигает 92 мкм. С ростом плотности тока микротвердость оксидного слоя на сплаве АД1 повышается с HV 615 при плотности тока 1 А/дм^2 до HV 635 при 5 А/дм^2 (при температуре 15 °С).

Температура электролита оказывает заметное воздействие на толщину и микротвердость оксидного слоя на сплавах. Толщина повышается при росте температуры с 5 до 25–35 °С, далее, при росте температуры до 45 °С – толщина снижается. При повышении

температуры для обоих сплавов микротвердость материала слоя снижается плавно, после превышения 25 °С – резко, для сплава АМг2 со значения HV 650 (при температуре 5 °С и плотности тока 1 А/дм^2) до HV 250–300.

Значения плотности рабочего тока и температуры электролита существенно влияют на шероховатость поверхности слоя: для сплава АД1 шероховатость увеличивается при температуре электролита 5 °С с *Ra* 0,3 при плотности 1 А/дм^2 до *Ra* 0,7 при 5 А/дм^2, а при температуре электролита 20 °С, соответственно, с *Ra* 0,55 до 1,0. Для сплава АМг2 при аналогичных условиях процесса выявлен рост шероховатости с *Ra* 1,3 до 2,0 при плотности 1 А/дм^2, а при плотности 5 А/дм^2 с *Ra* 2,0 до 3,8. Имеется возможность варьировать размерами нанопор в выращенных оксидных слоях (от 25 до 250 нм) и плотностью их размещения на поверхности изделия.

Трибологические свойств оксидных покрытий зависят от температуры электролита. ВВЭО сплава АМг2 повышает коэффициент бессмазочного трения от значения 0,2 до 0,8 при изменении температуры электролита с 5 до 20 °С и плотности тока от 2 до 5 А/дм^2. Минимальные значения коэффициента трения при температуре электролита 10–15 °С и плотности тока 2 и 5 А/дм^2 соответствуют минимальным значениями твердости покрытия, полученного при таких температурах; износостойкость покрытия на сплаве АМг2 после ВВЭО более, чем в 35 раз, превышает износостойкость сплава АМг2 в исходном состоянии.

Коррозионными испытаниями образцов из АМг2 в 5% водном растворе NaCl при 20 °С с выдержкой в течение 1–300 ч установлено, что интегральная скорость коррозии после ВВЭО в электролите $H_3PO_4 + H_3BO_3 + C_2H_2O_4$ при 45 °С с плотностью тока 5 А/дм^2 не превышает $1{,}5\cdot10^{-6}$ г/ м^2·ч после 300 часов выдержки в ванне, что в 3 раза меньше, чем для образцов исходного сплава. Испытаниями образцов из АД1 и АМг2 в солевом тумане 5%-го водного раствора NaCl при 35 °С и pH 6,0–7,0 показано, что если скорость коррозии сплава AMg2, не подвергнутого оксидированию, составляет $1\cdot10^{-7}$ г/м^2·ч, то после ВВЭО не превышает $1\cdot10^{-8}$ г/м^2·ч.

Разработана технология контролированного формирования оксидных покрытий на сплавах алюминия АД1 и АМг2 необходимой толщины, шероховатости поверхности, микротвердости, износо- и коррозионной стойкости материала, требуемого цвета с диапазоне от светлого, близкого к белому, до черного. Характеристики покры-

тий формируются путем управления составом и температурой электролита и плотностью рабочего тока. Технология применяется при обработке колец камер топливных насосов производства ЗАО «Завод Флометр», корпусов часов производства ОАО «Минский часовой завод» и других деталей.

Погудин С.А. Ижевский государственный
технический университет имени М.Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Переменный характер силы резания вследствие податливости системы СПИД вызывает изменение значений упругих перемещений поверхностей заготовки, составляющих значительную часть погрешности лезвийной обработки. Таким образом, для повы-шения точности деталей необходимо управлять упругими перемещениями системы СПИД.

В условиях фрезерования, при котором воздействие инструмента на заготовку носит прерывистый характер и происходит неравномерное колебательное воздействие сил резания на поверхность заготовки, должно обеспечиваться максимальное снижение упругих перемещений и, соответственно, неравномерного снятия припуска. Особо значимо выполнение этого условия при фрезеровании маложестких заготовок сложного профиля.

Результаты анализа научной и патентной литературы позволяет выделить следующие основные направления, по которым активно ведется решение задачи минимизации упругих перемещений в заготовке.

1. Оптимизация силы и способа закрепления заготовки. Закрепление должно быть достаточно надежным, чтобы положение заготовки сохранялось неизменным при воздействии сил резания и одновременно обеспечивало минимальную деформацию от зажимных устройств.

2. Оптимизация геометрических параметров и материала режущего инструмента. Выбор правильной геометрии инструмента приводит к уменьшению сил резания, напряжений и температуры в теле

заготовке, что в свою очередь приводит к уменьшению упругих перемещений. Использование при обработке маложестких деталей концевых фрез с неравномерным шагом зубьев, с постоянно изменяющимся углом наклона зуба, с волнообразной режущей кромкой снижает силы резания и нарушает строго периодический, цикличеcкий характер изменения действующих сил [1]. Постоянство условий резания позволяет сохранить выбор соответствующим условиям обработки марки инструментального материала.

3. Выбор оптимального режима и траектории фрезерования. Оптимизация траектории перемещения режущего инструмента позволяет сглаживать траекторию, уменьшать отклонения от направления сил резания.

4. Применение стратегии высокоскоростного (ВСФ) и сверхскоростного фрезерования (ССФ). Стратегия высокоскоростного и сверхскоростного фрезерования является высокоэффективным способом снижения температуры в зоне обработки и существенного снижения силы резания в зоне обработки. Наиболее полно принципы и возможности ВСФ и ССФ реализуются на 5-ти осевых фрезерных станках и многокоординатных токарно-фрезерных обрабатывающих центрах.

5. Создание систем адаптивного управления точностью обработки. Активный контроль процесса резания позволяет осуществлять выбор режимов резания в соответствии с фактической обрабатываемостью материала и параметрами заготовки. Наиболее эффективный метод контроля процесса резания основан на измерении силы резания. На основе данных о силе резания система адаптивного управления производит расчет оптимальных параметров резания – величины подачи и частоты вращения шпинделя [2].

В перечисленных направлениях управление упругими преремещениями основано на минимизации величины сил внешнего силового воздействия на заготовку (сил резания и закрепления). Это достигается организацией «щадящего» и, тем самым, непроизводительного режима обработки.

Весьма перспективным направлением решения задачи минимизации упругих перемещений в заготовке – наименее жестком звене технологической системы, является поддержание уровня ее жесткости на весь период обработки за счет конструкторских приемов.

Так, например, известен способ фиксации нежестких заготовок сложной формы с помощью блока самоустанавливающихся опор, когда каждая из опор занимает нужное положение в соответствии с

формой заготовки, будучи прижата к поверхности заготовки упругим элементом [3]. Известны способы фиксирования заготовки магнитными силами на магнитной плите, вакуумного закрепления заготовки, зажима жидкими средами с последующим охлаждением.

Другие известные способы повышения жесткости заготовки основаны на введении в ее конструкцию так называемых «жертвенных элементов», которые не являются функциональной частью готовой детали, но позволяют эффективно выдерживать ожидаемые усилия резания, экономить материал, снижать износ инструмента и т.д.

Еще один способ поддержания жесткости заготовки включает в себя определение модели заготовки детали путем ее сканирования и выполнение механической обработки заготовки, при которой оппозитно режущему инструменту прикладывают силовое воздействие с противоположной стороны заготовки [4]. Устройство для приложения силового воздействия выбирают исходя из конструктивных особенностей обрабатываемой детали. В качестве такого устройства может выступать, например, следящий люнет или вспомогательная опора, обеспечивающие реализацию режима постоянной жесткости обрабатываемой поверхности. В качестве примера такого устройства можно привести, например, робот-станок с параллельной кинематикой [5].

Для применения перечисленных способов поддержания и повышения жесткости заготовки в каждом конкретном случае требуется тщательный анализ ее напряженно-деформированного состояния под действием внешних сил. Численное решение этой задачи с помощью современных CAE-систем позволяет обоснованно назначать схему приложения и величину этих сил в зависимости от величины и направления сил резания и, тем самым, повышать режим фрезерования маложестких деталей сложного профиля без снижения точности их обработки.

Литература

1. Разработка концевых фрез для высокопроизводительной обработки авиационных деталей в условиях Иркутского авиационного завода / Д.С. Никулин, А.В. Савилов // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: Мат. всерос. с международ. участ. научн.-практ. семинара, 9–11 ноября 2011 г., г. Иркутск. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – С. 55–63.

2. Никитина Л.Г. Адаптивное управление станками // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 3. – С. 61–65.

3. Патент 2277466 RU, МПК B23Q3/155. Блок самоустанавливающихся домкратов / А.В. Балашов, В.А. Федоров, А.А. Черепанов и др. – Бюл. – 2006. – № 16.

4. Патент 2589957 RU, МПК B23Q15/00, B23Q1/25. Способ изготовления нежесткой детали / Ю.В. Пузанов, В.В. Тарасов, В.Ю. Пузанов, В.В. Некопыткин. – Бюл. – 2015. – № 35.

5. Робот-станок с параллельной кинематикой // Альфа-интех. Будущее создается настоящим. URL : http://alphajet.ru/content/robot-stanok-s-parallelnoi-kinematikoi (дата обращения: 05.04.2017).

Польский Е.А., Никонов О.А., Митраков Н.С.
Брянский государственный технологический
университет, Брянск, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИИ МАРШРУТНО-ОПЕРАЦИОННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕТОДОМ СИНТЕЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ CALS ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

Качество продукции закладывается на первых этапах жизненного цикла: проектировании, при решении вопроса по обеспечению требуемых эксплуатационных показателей узлов машин через эксплуатационные свойства, технологической подготовки производства, с выбором стратегии обработки элементарной поверхности для достижения параметров качества поверхностного слоя детали обеспечивающих ее установленную долговечность, и сборки, при которой происходит контактирование поверхностей деталей и осуществляется их действительное взаимное расположение [1].

Подготовка производства в современных условиях, не может осуществляется без использования средств автоматизации и систем автоматизированного производства (CAD/CAM/CAE-систем). Однако отдельное использование этих средств не дает желаемого результата, а иногда создает еще и дополнительные препятствия. В настоящее время вопросы технологической подготовки могут быть решены на качественно новом уровне с использованием интегрированных САПР. Применение этих систем должно быть неразрывно

связано с CALS-технологиями – современными технологиями информационной интеграции процессов, выполняющихся в ходе всего жизненного цикла продукции и ее компонентов.

Генеративный подход к разработке технологии подразумевает автоматический синтез стратегии обработки на основании геометрической конфигурации и технических требований, предъявляемых к детали, с указанием сведений о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках контроля изделия. При этом создаются предпосылки к реализации нового принципа проектирования – технологическое обеспечение требуемых параметров долговечности изделия при проектировании конструкции и разработке чертежей деталей на основе анализа размерных связей, включающего расчет технологически обоснованных значений конструкторских размеров с учетом их изменения в процессе эксплуатации для повышения надежности функциональных показателей машин. Принцип одноступенчатого проектирования для обеспечения точности конструкций предполагает управление точностью непосредственно элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Это особенно актуально на опытном производстве при подготовке к выпуску новых изделий, а также в мелкосерийном и единичном производстве, так как в этом случае обычно не разрабатывается весь комплекс документации, предусмотренный стандартами разработки и постановки продукции на производство, а сама разработка проектов осуществляется силами нескольких специалистов.

Структуру конструкторско-технологической модели (КТМ) формообразования детали $Q_{\text{кг}}$, можно представить следующим образом [2]:

$$Q_{КТ} = \langle Z, M_{КТ}, \text{С}_{\text{КТ}}, S \rangle; \qquad (1)$$

где $Z = \langle Z_1 \ldots Z_n \rangle$ – данные для идентификации детали и общие сведения о ней; $M_{КТ} = \langle Э_{КТ}, O_{КТ} \rangle$ – структурный состав детали; $Э_{КТ}$ – множество конструкторско-технологических элементов (КТЭ); $О_{КТ}$ – множество отношений над ними; $C_{КТ} = \langle Э_{КТ}, И \rangle$ – множество схем обработки конструкторско-технологического элемента; $И = \langle И_1 \ldots И_n \rangle$ – данные об инструменте, реализующем *i*-ю схему обработки; $S = \langle Б_c, Д_c \rangle$ – структурный состав станка; $Б_С$ – множество блоков станка; $Д_С$ – множество движений блоков станка.

В отличие от обобщенной КТМ, в данном определении отсутствуют основные технологические базы, предполагается, что их опре-

деление является одной из функций САПР ТП. Кроме того, используется единственный уровень расчленения детали.

На основе 2D и 3D модели детали, КТЭ можно представить в виде следующего кортежа данных:

$$Э_{КТ} = \langle П, (Э_{3D}, Э_{ч}, O), C \rangle, \quad (2)$$

где $П = \langle П_1 \ldots П_m \rangle$ – параметры, описывающие КТЭ; $Э_{3D}$ – множество элементов трехмерного представления КТЭ; $Э_{ч}$ – множество элементов двумерного представления КТЭ; О – множество отношений над ними; С – множество ограничений на параметры и структуру КТЭ.

К параметрам КТЭ относятся: геометрические размеры, система координат КТЭ, параметры шероховатости основных поверхностей, параметры точности, вид термообработки, механические свойства, вид поверхностного покрытия.

Некоторые из перечисленных параметров имеют нечеткую природу. Так, например, коническая поверхность, присутствующая в модели, может интерпретироваться и как КТЭ фаска, и как КТЭ коническая ступень вала, при этом, различие между ними можно выразить так – протяженность фаски много меньше, чем ступени вала, кроме того, параметры точности и шероховатости исполнения фаски, как правило, не высоки в отличии от ступени и лежат в нечетко определенном интервале.

Представленное в данной работе математическое обоснование процедуры распознавания КТЭ, подразумевает автоматическое формирование КТЭ существующей 3D модели детали, без участия человека. Непосредственная реализация описанной здесь математической модели на данном этапе исследования, может быть затруднена. Данный вопрос будет рассмотрен ниже в следующих главах данной работы. Геометрическую модель (ГМ) детали $Q_Г$ можно описать как

$$Q_Г = \langle Э_Г, O_Г \rangle, \quad (3)$$

где $Э_Г$ – множество геометрических элементов, $О_Г$ – множество отношений над ними.

Тогда задачу декомпозиции ГМ на КТЭ можно сформулировать следующим образом: определить все возможные подмножества $Q_Г$, определяемые зависимостью (3) и удовлетворяющие ограничениям С.

Схема обработки конструкторско-технологического элемента ($С_{КТ}$) можно представить, как взаимодействие самого КТЭ ($Э_{КТi}$) и инструмента ($И_i$). При этом в данной работе нас будет интересовать только движения КТЭ ($ДЭ_{КТi}$) и движения инструмента ($ДИ_i$), образующих схему обработки [2, 3].

Структурный состав станка (S) представляется совокупностью составляющих его блоков ($Б_С$) и множеством движений ($Д_С$), характеризующих каждый блок станка. Однако, для общего представления информации о станке, на данном этапе необходимы следующие данные о блоках станка. Необходимые данные можно отнести к параметрам каждого из блоков станка:

назначение блока станка (для обеспечения движения инструмента или детали); возможность обеспечения, назначения блоком своих функций, описывается множеством объектов, которые могут использоваться данным блоком.

Приняв, что мы получили КТЭ, описывающие исходную деталь, для каждого КТЭ можно получить массив схем обработок при использовании различных формообразующих движений станка и технологических возможностей инструмента.

Литература

1. Наукоемкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / А.Г. Суслов, О.Н. Федонин, Е.А. Польский // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. – № 5 (59). – 48 с.

2. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации / Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2014. – № 11 (41). – С. 36–44.

3. Модель комплексного анализа размерных связей для обеспечения точности сборочных соединений / Е.А. Польский, Д.М Филькин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 5/277 (576). – С. 59–66.

Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Аксьом П.А.
Національний транспортний університет, Київ, Україна

ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ ПОЛІПШЕННЯ ОБРОБЛЮВАНОСТІ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

Я.Г. Усачовим була висловлена та експериментально перевірена гіпотеза щодо позитивного впливу холодного пластичного деформування на оброблюваність різанням маловуглецевих сталей феритного класу [1].

Проблема оброблюваності широкого спектру сталей на низьких швидкостях різання всебічно вивчена одним із авторів даної статті [2–5]. Було встановлено, що об'ємне холодне пластичне деформування (ХПД), яке передує різанню, позитивно впливає на характеристики останнього процесу: сили, температуру, зону стружкоутворення, усадку стружки, контактні явища на передній і задній поверхнях інструменту, інтенсивність наростоутворення, заповнення стружкових канавок при протягуванні тощо. При цьому відзначалось, що спостерігається також позитивний вплив ХПД на фізико-технічні та геометричні властивості обробленої поверхні.

Однак відомо, що сталі аустенітного класу (тепло–, корозійно– та зносостійкі) мають виключно низьку оброблюваність лезовим чи абразивним інструментом. Це обмежує застосування таких сталей у точних деталях машин. Більшість виробів із аустенітних сталей використовується у техніці після лиття, пресування, волочіння, тобто без фінішної механічної обробки. З метою розширення номенклатури цього класу деталей нами проведене комплексне дослідження, кінцевим результатом якого було поліпшення оброблюваності аустенітних сталей різанням. Вперше було встановлено, що оптимальним шляхом досягнення поставленої мети є поєднання ХПД з дією мастильного середовища. Причому таке середовище повинно створюватись на основі екологічно чистих мастил рослинного походження (рапсових, соняшникових, льняних.

Роль ХПД у цьому випадку полягає в тому, що при проведенні такого процесу виконується частина роботи, яку мала б виконати обробка різанням цього ж матеріалу, але попередньо не зміцненого холодною деформацією. А використання вказаного вище середовища поліпшує контактні процеси на передній поверхні інструменту. Таким чином, отримуємо подвійний позитивний ефект: з боку зони стружкоутворення через попереднє об'ємне ХПД і з боку контактної зони через нове середовище [6].

У процесі досліджень застосовувався запропонований нами новий ефективний, але простий метод поперечного стиску оброблюваного матеріалу, що забезпечувало необхідну кількість цього матеріалу для експериментів. Величина попередньої холодної деформації регулювалась у широких діапазонах. Для цього було достатньо гідравлічного пресу зусиллям 200 тс.

На рис. 1 показано установку для отримання металографічних шліфів Beta Grinder–Polisher, виробництва фірми Buehler, що знахо-

диться в НТУУ “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, яка використовувалася нами у дослідницькій роботі.

Теорія та практика обробки матеріалів різанням передбачає для осучаснення даної науки перехід від чисто феноменологічних методів до фізичних [7]. У нашому дослідженні також використано дане положення [8]. Виходячи з цього, було проведено серію точних експериментів із застосуванням електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа РЭМ–106И (рис. 2).

Рисунок 1 – Установка для отримання металографічних шліфів

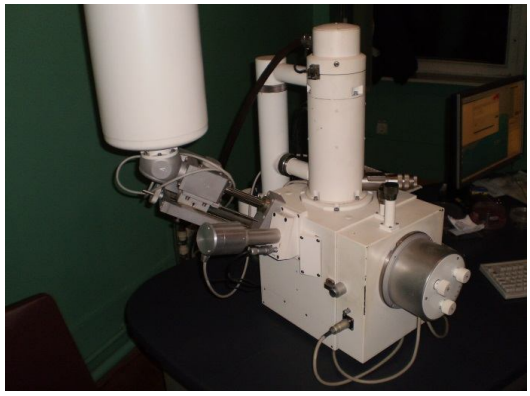


Рисунок 2 – Електронний мікроскоп РЭМ–106И

Метою цих експериментів було виявлення впливу об’ємного ХПД на густину дислокацій у аустенітних сталях. На рис. 3, як приклад, подано розподіл дислокацій по глибині зразків із сталі 08Х18Н10 (AISI 304) у початковому (рис. 3, *а*) та після обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 46\%$ стані (рис. 3, *б*, *в*).

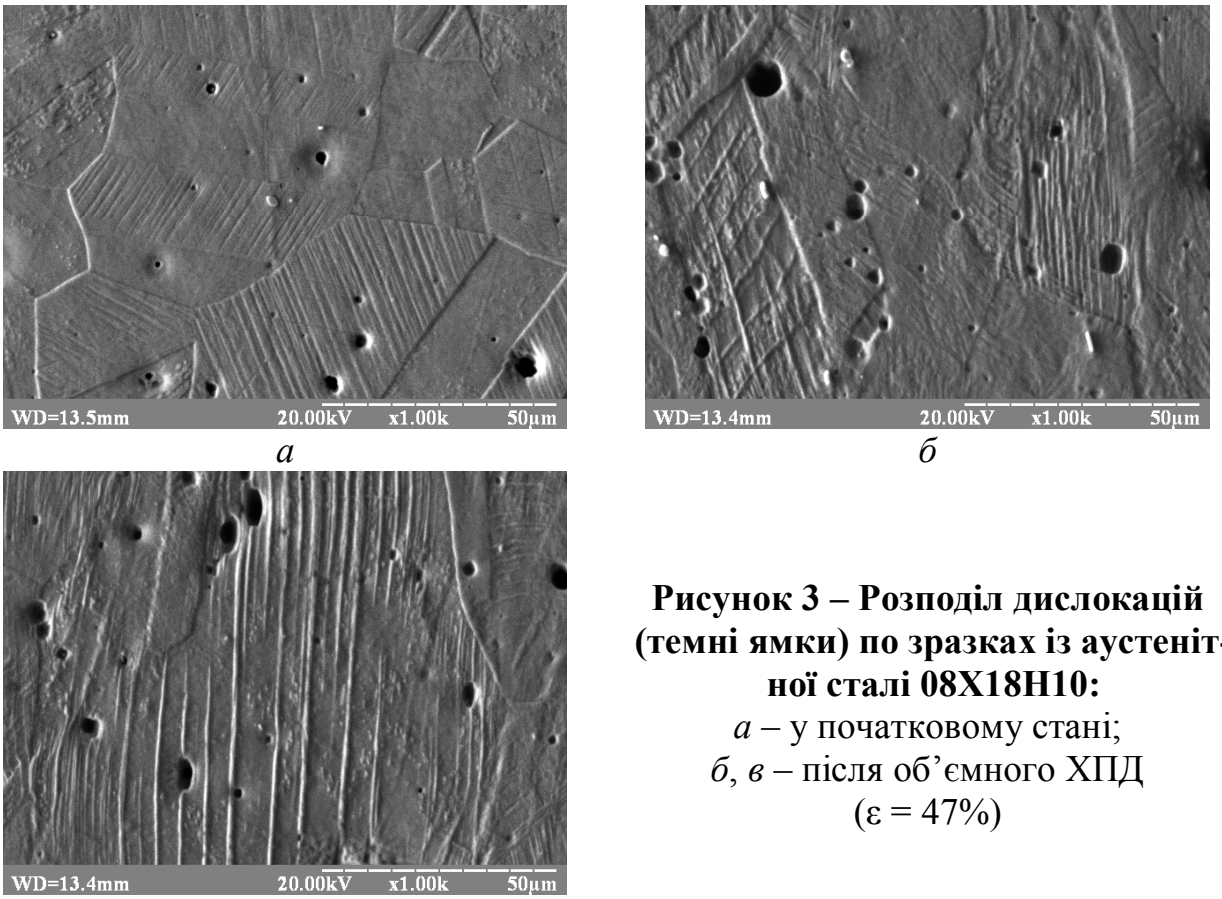
Обробка мікрошліфів за відомими методиками показала, що густина дислокацій ρ в результаті обробки зразків об’ємною ХПД збільшується (з $\rho = 1{,}86 \cdot 10^5$ см$^{-2}$ до $\rho = 6{,}13 \cdot 10^5$ см$^{-2}$).

Чому автори вдались до старанного дослідження дислокацій? Справа в тому, що об’єднання цих дефектів служать основою для формування мікротріщин у матеріалі, що сприяє поліпшенню оброблюваності різанням аустенітних сталей.

Для повернення початкових властивостей деталей із аустенітних сталей (високої тепло-, корозійно- та зносостійкості) автори рекомендують як заключну операцію прецизійну термообробку, наприклад, високе відпускання з мінімальними термічними деформаціями деталей.

Висновок. Для підвищення оброблюваності аустенітних сталей рекомендується застосовувати попереднє об’ємне ХПД з використанням екологічно чистих мастил рослинного походження. Таке по-

єднання дозволяє отримати сумісний позитивний ефект при різанні з боку зони стружкоутворення і контактної зони на передній поверхні інструменту. Поліпшення оброблюваності при використанні попереднього ХПД пояснюється збільшенням густини дислокацій, об'єднання яких призводить до появи мікротріщин у обробленому матеріалі. Повернення початкових високих експлуатаційних властивостей виробів із аустенітних сталей (тепло–, корозійно– та зносостійкості) рекомендується застосуванням прецизійної фінішної термообробки, наприклад, високого відпускання.



а *б* *в*

Рисунок 3 – Розподіл дислокацій (темні ямки) по зразках із аустенітної сталі 08Х18Н10:
а – у початковому стані;
б, *в* – після об'ємного ХПД
(ε = 47%)

Література

1. Усачев Я.Г. Явления, происходящие при резании металлов / Русские ученые – основоположники науки о резании металлов: монография / Я.Г. Усачёв; под. ред. К.П. Панченко. – М.: Машгиз, 1952. – С. 356–384.

2. Посвятенко Э.К. Научное обоснование эффективности процесса деформирующе–режущего протягивания: автореф. дис. … д–ра техн. наук / Ин–т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – К., 1993. – 35 с.

3. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхности деталей / Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко и др. – Харків: Щедра садиба плюс, 2015. – 259 с.

4. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник / Под общ. ред. А.И. Грабченко, В.А. Залоги. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.

5. Механіка комбінованого протягування графітовмісних чавунів: монографія / За ред. Е.К. Посвятенка. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2017. – 288 с.

6. Відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія “Технічні науки”: Наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2015. – Вип. 2 (32). – С. 210–221.

7. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов // М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

8. Про вплив дислокацій на фізико-механічні властивості феритних та аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, О.В. Мельник // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Мат. 17–го международ. науч.-техн. семинара, 20–24 февраля 2017 г., г. Свалява. – К.: АТМ Украины, 2017. – С. 239–241.

Прокофьев А.Н., Польский Е.А., Звягинцев Ф.Д.
Брянский государственный технологический университет, Брянск, Россия

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СВАРНЫХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ CALS ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ

Постоянное повышение требований к качеству проектирования, при одновременной необходимости ускорения темпов выполнения этих работ, приводит к необходимости параллельной разработки документации при выполнении мероприятий конструкторско-технологической подготовки производства и создания единых конструкторско-технологических отделов. В результате создаются предпосылки реализации нового принципа проектирования – технологического

обеспечения требуемых эксплуатационных показателей машин и их надежности при одновременном проектировании технологии механической обработки с уточнением параметров сборки.

Принцип проектирования для обеспечения точности конструкций предполагает управление точностью непосредственно элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Такое проектирование актуально при любом типе производства и любой сложности технического проекта.

В результате объединения размерных цепей с учетом формирования каждого типа размеров могут быть назначены предельные отклонения исходных размеров [1, 2].

$$T_{\Delta} = \sum_{i}^{n} c_i T_{Si} + \sum_{j}^{m} c_j k_{внутj} k_{внешj} k_{Тээк} + \sum_{k}^{l} c_k k_{внутk} k_{внешk} k_{Тээк} , \qquad (1)$$

где c – коэффициенты передаточных отношений; T_S, – допуски технологических размеров; $k_{внут}$, $k_{внеш}$, $k_д$, $k_{Тэк}$ – коэффициенты, формирующие допуски эксплуатационных размеров, соответственно для внутренних и внешних факторов, долговечности, точности расчетной схемы, используемой для определения параметров эксплуатационных свойств.

Значения дополнительных эксплуатационных звеньев являются функциями, которые определяются внешними и внутренними факторами. К внешним факторам можно отнести условия эксплуатации: величину и характер нагрузки, скоростные режимы, планируемые долговечность и др. К внутренним факторам – параметры, которые определяют эксплуатационные свойства сопряженных поверхностей: материал деталей, смазочные материалы, параметры качества поверхностного слоя и др.

При обработке хребтовой рамы железнодорожного вагона основной особенностью является включение в анализ размерных связей компенсации теплового деформирования исходного полуфабриката в результате выполнения сварочных операций и сверления системы отверстий большого диаметра (рис. 1).

Выделение из эксплуатационного допуска $k_{внеш\ j}$ и $k_{внут\ j}$ удобно при выполнении прямой задачи размерного анализа. Вместе с коэффициентами передаточных отношений, эти новые коэффициенты позволяют сравнивать относительную значимость воздействия различных эксплуатационных звеньев на точность замыкающего звена. Другими словами, можно видеть, к каким поверхностям предъявляются более высокие требования (по точности для обычных техно-

логических звеньев и по параметрам качества поверхностного слоя для эксплуатационных звеньев).

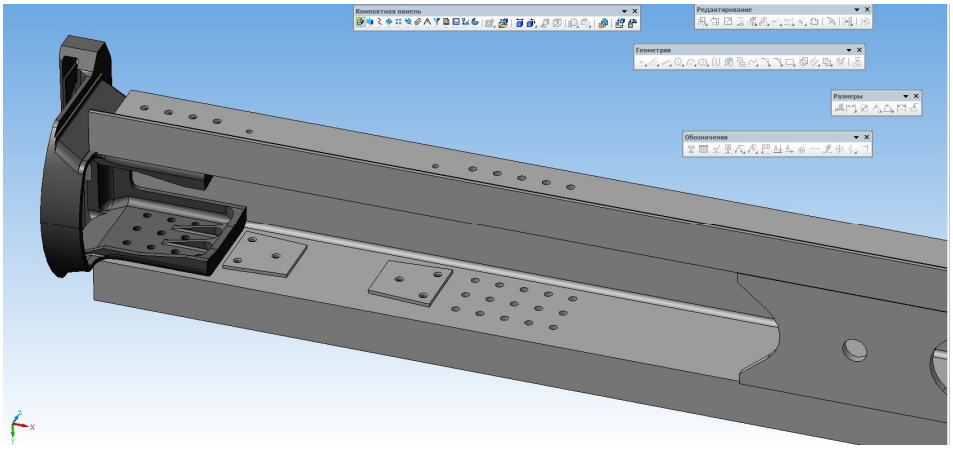


Рисунок 1 – Модель хребтовой рамы с установленными элементами и отверстиями

Разработанная система позволяет учитывать целый ряд технологических параметров и получать оптимальный набор технологических баз для заданных начальных условий. Поиск оптимального набора выполняется на основе исходной информации о конфигурации деталей, особенностях выбранных технологических баз, вида операций технологических процессов, технологических возможностей в обработке отдельных поверхностей деталей и других параметров. В результате выполняется определение коэффициентов технологичности баз и возможных технологических (операционных) размеров.

Поиск допусков технологических размеров и параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих необходимые значения эксплуатационных свойств, следует выполнять методами математического программирования. В качестве целевой функции обычно выбирают себестоимость изготовления и эксплуатации узла, но при необходимости можно использовать функцию, характеризующую требуемую надежность, функцию производительности или любую другую функцию, описывающую необходимый критерий оптимальности.

Следовательно, решение задачи будет сведено к системе [3]

$$\begin{cases} F = f(S, k_{Tээ}, z) \to \min \\ CT_{Skz} \le T_{\Delta} \end{cases} \qquad (2)$$

где F – целевая функция, используемая для оптимизации параметров размерной цепи; C – матрица, содержащая передаточные коэффициенты составляющих звеньев цепи; T_{Skz} – вектор искомых пара-

метров составляющих звеньев; T_Δ – вектор допусков исходных параметров узла; z – звенья припусков на механическую обработку.

Размеры, входящие в размерную цепь, необязательно являются независимыми величинами. Между ними могут существовать различного рода связи. Например, обычные технологические размеры деталей, изготовленных с применением одного и того же приспособления, инструмента или на одном и том же настроенном оборудовании, часто имеют корреляционную связь. Корреляция оказывает дополнительное воздействие при расчете допуска замыкающего звена вероятностным методом [2]:

$$K_{\Sigma r}^2 T_{\Sigma r}^2 = \sum_{i,j}^{pq} C_{ij}^2 K_{ij}^2 T_{ij}^2 + 2\sum_{j=1}^{q}\left(C_j K_j T_j \sum_{i=2}^{m(n,\ldots,p)} r_{ij} C_{ij} K_{ij} T_{ij} \right), \quad (3)$$

где i – порядковый номер зависимых величин внутри каждой группы; j – порядковый номер групп зависимых величин.

Комплексное решение конструкторско-технологических задач обеспечения требуемой точности размеров деталей на основных этапах жизненного цикла изделия возможно на основе концепции автоматизированной подсистемы технологической подготовки производства, обеспечивающей определение конструктивных размеров и корректировку точности функциональных размеров отдельных деталей по критериям повышения технологичности конструкции при оптимизации простановки технологических размеров для различных вариантов реализации операций механической обработки, в том числе на операциях промежуточной сборки (сварки).

Литература

1. Наукоемкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / А.Г. Суслов, О.Н. Федонин, Е.А. Польский // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 5 (59). – 2016. – 48 с.

2. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации / Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Наукоемкие технологии в машиностроени. – 2014. – № 11 (41). – С. 36–44.

3. Модель комплексного анализа размерных связей для обеспечения точности сборочных соединений / Е.А. Польский, Д.М Филькин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 5/277 (576). – С. 59–66.

Пустохин Д.С., Круглов В.В., Пачурин Г.В. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

АЭРОЗОЛЬНОЕ ЭПИЛАМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

В современных конструкциях машин, оборудования и металлоизделий используются определенные группы конструкционных материалов, служебные свойства которых регламентируются эксплуатационной долговечностью [1–3]. Они изготавливаются различными процессами обработки давлением. Известно, что влияние предварительной пластической обработки проявляется через изменение структурно-механических характеристик материала [4, 5].

Различные условия эксплуатации отличаются величиной, характером нагрузки, температурными условиями и средой, которые по-разному влияют на сопротивление разрушению [6, 7]. Постоянно возрастающий интерес к проблеме изготовления высококачественных металлоизделий связан с существующей потребностью в обеспечении эксплуатационной надежности металлов и сплавов. Кинетика накопления повреждений при любом виде нагружения существенным образом зависит от структурного состояния конструкционных материалов [8], в свою очередь обусловленного видом и режимом их технологической обработки [9].

При изготовлении ответственных деталей применяют различные методы упрочнения поверхностного слоя для придания ему необходимых свойств. При этом некоторые методы упрочнения невозможно применять для крупногабаритных деталей с труднодоступными полостями. Эффективным методом физико-химического улучшения качества поверхности металлических и неметаллических тел является эпиламирование, успешно применяемый с 80-х годов двадцатого века [10].

Технология эпиламирования основывается [11] на использовании поверхностно-активных веществ во фторуглеродных легкоиспаряющихся растворителях. Такие растворы (эпиламы) наносятся на поверхность и после испарения образовывают тончащую пленку толщиной 4…100 нм. Если применение стандартных методов эпиламирования невозможно, то применение аэрозольного нанесения эпилама в несколько слоев будет более целесообразно еще и по тому, что при распылении образуется так называемый туман, вследст-

вие чего мелкодисперсные фракции композиции проникают в глубь детали если та имеет в своей компоновке полости отверстия и другие внутренние поверхности, которые так же требуется обработать.

При этом деталь для обработки эпиламом надо соответствующим образом подготовить, а именно удалить масляную пленку и другие виды загрязнения с поверхности детали. После так называемой «моечной» операции деталь необходимо просушить, для обработки эпиламом подходит даже воздушная сушка, но и возможно использовать специальные камеры или инструмент которым можно подавать подогретый воздух на поверхность детали. После того как деталь будет высушена, следует нанести эпиламирующий состав, заводом изготовителем [12], предусмотрено послойное нанесение эпилама, с межслойной выдержкой в 10–15 минут. Затем деталь следует просушить. В результате термической фиксации растворители, находящиеся в смазочной композиции, испаряются, а на детали образуется пленка из ориентированных молекул фтора.

Анализ данных полученных в результате показывает, что после обработки и нанесения многофункциональной нано пленки изделие меньше подвержено коррозии, сохраняется масляная пленка на поверхности детали, что способствует антифрикционным и гидрофобным свойствам изделия.

Литература

1. Пачурин Г.В. Усталостное разрушение при нормальной температуре предварительно деформированных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. – № 10. – С. 35–38.

2. Пачурин Г.В. Повышение эксплуатационной долговечности нержавеющих сталей технологическим упрочнением // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 2–2. – С. 28–32.

3. Пачурин Г.В. К вопросу о гипотезах коррозионно-усталостного разрушения металлов и сплавов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3–1. – С. 28–34.

4. Пачурин Г.В. Долговечность пластически деформированных коррозионно-стойких сталей // Вестник машиностроения. – 2012. – № 7. – С. 65–68.

5. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. – 2008. – т. 38, № 3. – P. 217–220.

6. Пачурин Г.В. Усталостное разрушение при нормальной температуре предварительно деформированных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. – № 10. – С. 35–38.

7. Пачурин Г.В., Галкин В.В., Пачурин В.Г. Долговечность упрочненных металлов и сплавов: учебное пособие / Г.В. Пачурин, В.В. Галкин, В.Г. Пачурин. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. - 228 с.

8. Пачурин Г.В. Роль структуры поверхности в коррозионной усталости деформированных металлических материалов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1.

9. Пачурин В.Г., Галкин В.В., Пачурин Г.В. Оценка деформационной неоднородности в раскатанных изделиях с клиновым профилем // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-4. – С. 765-773.

10. Смазочная компания интер-авто. http://termosmazki.ru/stati/epilamirovanie-kak-sposob-uluchsheniya-harakteristik-instrumenta.

11. Нано индустрия. http://www.nanoindustry.su/journal/article/3306.

12. ООО «Автостанкопром». http://avtostankoprom.ru/technology/technology/.

Рощупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А.,
Минина Н.А., Покрасина Е.М., Кудрявцев Е.М.,
Нестеренко Е.А, Кольцов А.Г. Институт металлургии
и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 30ХГСА В ЗАКАЛЕННОМ И ОТОЖЖЕННОМ СОСТОЯНИЯХ

Сталь 30ХГСА относится к классу конструкционных легированных (хромокремнемарганцевых) сталей и используется в основном при производстве оборудования, эксплуатация которого не предполагает сильного нагревания. При этом исследованная сталь используется как в отожженном (охлаждение от 880 °С с печью), так и в закаленном состояниях (нагрев до температуры 880 °С с последующим охлаждением в масло [1]). Для учета температурного расширения образцов были проведены дополнительные дилатометрические исследования. Химический состав стали по данным [2] представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав стали 30ХГСА по данным [2], масс.%

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,28–0,34	0,9–1,2	0,8–1,1	≤ 0,3	≤ 0,025	≤ 0,025	0,8–1,1	≤ 0,3

Исследование акустических свойств стали проводилось по Методике ГСССД [3], разработанной авторами работы, при этом в качестве «реперных» значений при построении температурных зависимостей акустических свойств использовались значения этих параметров, полученные эхо-импульсным методом [4] на проволочных образцах при комнатной температуре на воздухе. Опытные результаты дилатометрических исследований на высокоскоростном термическом дилатометре DL-1500-RH, позволили не только повысить надежность и точность опытных данных об акустических свойствах, но и построить температурную зависимость плотности стали. Плотность стали при комнатной температуре определялась методом гидростатического взвешивания. По опытным данным о скорости ультразвука с и плотности ρ легко рассчитать значения модуля Юнга $E = \rho c^2$. Для дополнительных исследований температурных границ фазовых превращений в стали авторы использовали акустико–эмиссионный программно-технический комплекс СДС-1008_2 [5], позволяющий проводить регистрацию, обработку и анализ сигналов акустической эмиссии при проведении научных исследований.

На рис. 1 приведены опытные данные о скорости ультразвука в отожженном и закаленном состояниях (*а*), относительного температурного расширения (*б*) и акустико-эмиссионных свойств (*в, г*) исследованной стали. Следует отметить, что опытные данные о скорости ультразвука и относительного температурного расширения (ОТР) для закаленного и отожженного образцов практически совпали между собой, также как и значения плотности отожженного и закаленного образцов при комнатной температуре. Из рисунка видно, что при температуре ~700 °С на температурных зависимостях исследованных свойств наблюдается заметная аномалия, связанная с происходящим в стали α→γ – превращением [1]. В работах авторов подобное поведение ОТР отмечалось и ранее для стали 20 [6]. На рисунке наблюдается еще одна особенность в поведении скорости ультразвука при температуре ~ 1020 °С. Возможным объяснением этой аномалии может служить достаточно большое содержание в

стали марганца, в котором согласно [7] при температуре ~1080 °С происходит β→γ – превращение. Наличие особенностей в поведении исследованных свойств подтверждаются и результатами акустико-эмиссионных исследований. Акустико-эмиссионный метод исследования фазовых превращений успешно использовался авторами и ранее [8].

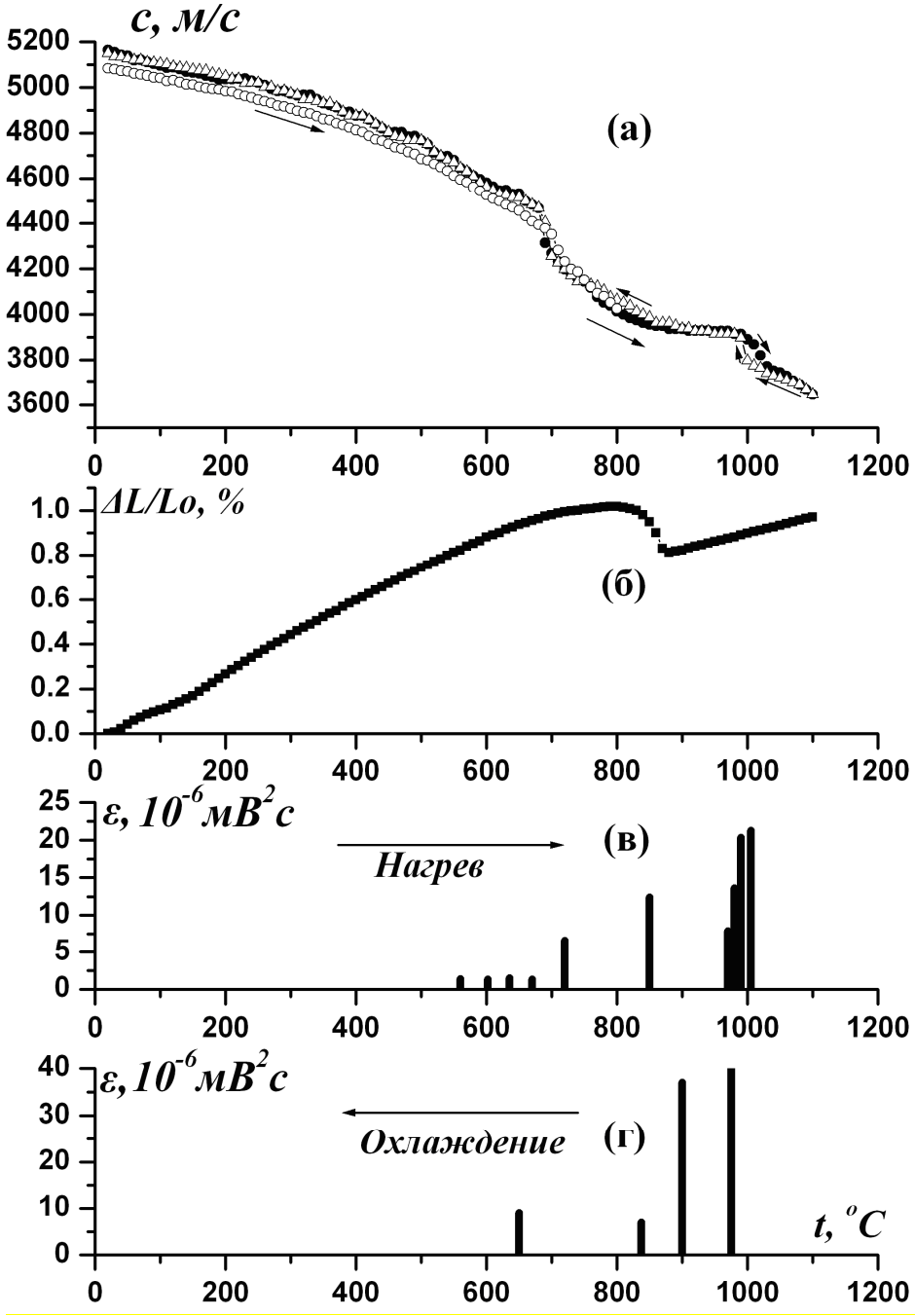


Рисунок 1 – Результаты экспериментального исследования скорости ультразвука (*а*) (отожженный образец: ● – нагрев, Δ – охлаждение; закаленный образец: ○ – нагрев), относительного температурного расширения при нагреве (*б*) и энергии ε сигналов акустической эмиссии (*в, г*) стали 30ХГСА

Опытные данные о коэффициенте затухания ультразвука подтвердили наличие особенностей в указанном температурном диапазоне, но, так как, эти результаты не используются в дальнейших расчетах, в работе они не приводятся.

Полученные экспериментальные и рассчитанные на их основе данные о свойствах стали 30ХГСА обрабатывались методом наименьших квадратов для получения температурных зависимостей в виде

$$Y = A + Bt + Ct^2 + \ldots, \quad (1)$$

где Y – свойство, t – температура в °С.

В математическую обработку включались опытные данные при нагревании стали до температуры ~700 °С, выше которой наблюдались особенности в поведении исследованных свойств. В табл. 2 приведены коэффициенты аппроксимирующих уравнений для свойств исследованной стали в указанном температурном диапазоне.

Таблица 2 – Значения коэффициентов аппроксимирующего уравнения (1) для стали 30ХГСА

Свойство	A	B	C	D
Отожженный образец				
Скорость звука c, м/с	5151,0	–0,243	–0,001	–
Относительное температурное расширение $\Delta L/L_0$, %	–0,038	0,002	–	–
Плотность ρ, кг/м^3	7813,7	–0,408	$8{,}4\cdot10^{-5}$	–
Модуль Юнга E, ГПА	207,5	–0,033	$-7{,}6\cdot10^{-5}$	–
Закаленный образец				
Скорость звука c, м/с	5090,5	–0,456	$-2{,}5\cdot10^{-4}$	$-9\cdot10^{-7}$
Модуль Юнга E, ГПА	201,4	–0,296	$-7{,}5\cdot10^{-5}$	–

Литература

1. Марочник сталей и сплавов / Под общей ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

2. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. ГОСТ 4543-71. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 49 с.

3. Методика экспериментального определения скорости и коэффициента затухания ультразвука в твердых телах в диапазоне температур 20….1000 ^{0}С на проволочных образцах с акустической меткой. ГСССД МЭ 216-2014 / В.В. Рощупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин и др. – М.: ФГПУ «Стандартинформ», 2014. – 23 с.

4. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1970. – 238 с.

5. Акустический и акустико-эмиссионный методы исследования физико-механических свойств конструкционных сталей / И.И. Новиков, В.В. Рощупкин, М.А. Покрасин и др. // Приборы. – 2012. – № 3. – С. 51–57.

6. Экспериментальное исследование акустических свойств стали 20 / И.И. Новиков, В.В. Рощупкин, М.М. Ляховицкий и др. // Перспективные материалы. – 2014. – № 6. – С. 79–84.

7. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

8. Акустические и акустико-эмиссионные свойства ферритно-мартенситных хромистых сталей / И.И. Новиков, В.В. Рощупкин, А.Г. Кольцов и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 2. – С. 87–91.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 15-08-00645а и 15-08-04272а)

Рощупкин В.В., Терентьев В.Ф., Пенкин А.Г., Покрасин М.А., Кольцов А.Г. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

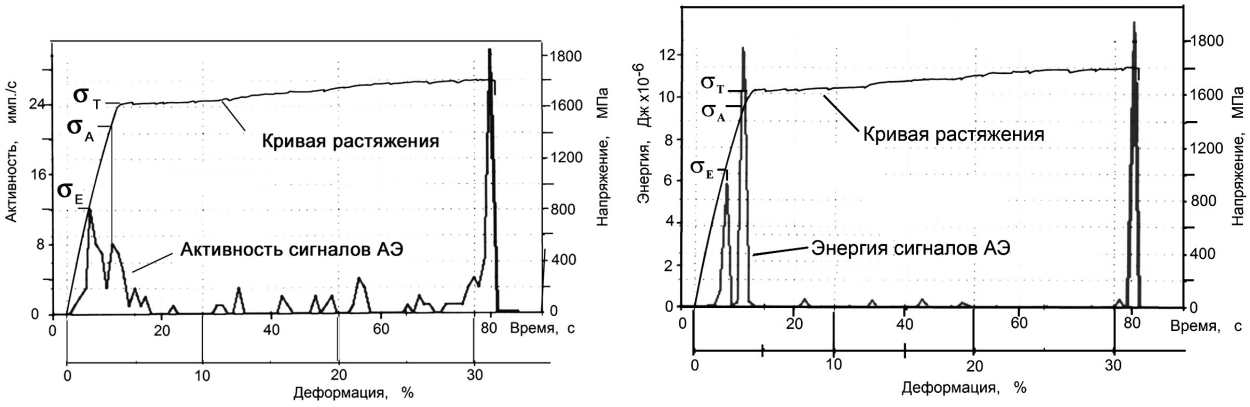
АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ТОНКОЛИСТОВОЙ ТРИП-СТАЛИ НА СТАДИИ МИКРОТЕКУЧЕСТИ

Исследованы образцы из холоднокатаной ленты толщиной 0,3 мм из аустенитно-мартенситной (43% α-фазы и 57% γ-фазы) трип-стали ВНС9-Ш (23Х15Н5АМ3-Ш). Химический состав стали ВНС 9-Ш (мас. %): 0,20–0,25 C; 14,5–16,0 Cr; 4,8–5,8 Ni; 2,7–3,2 Mo; Mn ≤ 1,0; Si ≤ 0,6; 0,03–0,07 N; S ≤ 0,01; P ≤ 0,015; Fe-основа. Испытания на статическое растяжение образцов с рабочей частью 0,3×7×20 мм проводили со скоростью $\dot{\varepsilon} = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ $с^{-1}$. Исследования акустической эмиссии (АЭ) проводили с использованием диагностической системы СДС1008 [1].

Кривая статического растяжения характеризовалась заметной микропластической деформацией и протяженной площадкой теку-

чести. Были получены следующие механические свойства: предел прочности $\sigma_в$ = 1813 МПа; физический предел текучести $\sigma_т$ = 1650 МПа, относительное удлинении δ = 27,4%. Длина площадки текучести $Ɛ_т$ = 8%, а деформация микротекучести $Ɛ_м$ = 0,7%. Рентгеновский анализ не показал изменение фазового состава на стадии миикротекучести деформирования.

На рис. 1 приведены данные по изменению активности Ń и средней энергии сигналов Е АЭ. На стадии микротекучести было зарегистрировано два максимума активности и средней энергии импульсов АЭ, (рис. 1), которые связаны с особенностями микропластической деформации. При этом отмечено, что первые пики активности и энергии сигналов АЭ соответствуют различным уровням напряжения. На стадии микротекучести (вплоть до возникновения зуба текучести) у металлов с физическим пределом текучести наблюдаются характерные напряжения σ_E и σ_A (по терминологии Н. Брауна [2]) (рис. 1, б). До достижения σ_E не наблюдается изменения дислокационной структуры во внутренних объемах металла, однако происходит движение отдельных дислокаций в приповерхностных слоях металла.



а *б*

Рисунок 1 – Изменение активности сигналов АЭ (Ń) (*а*) и средней энергии импульсов Е АЭ (*б*) от степени пластической деформации или времени нагружения)

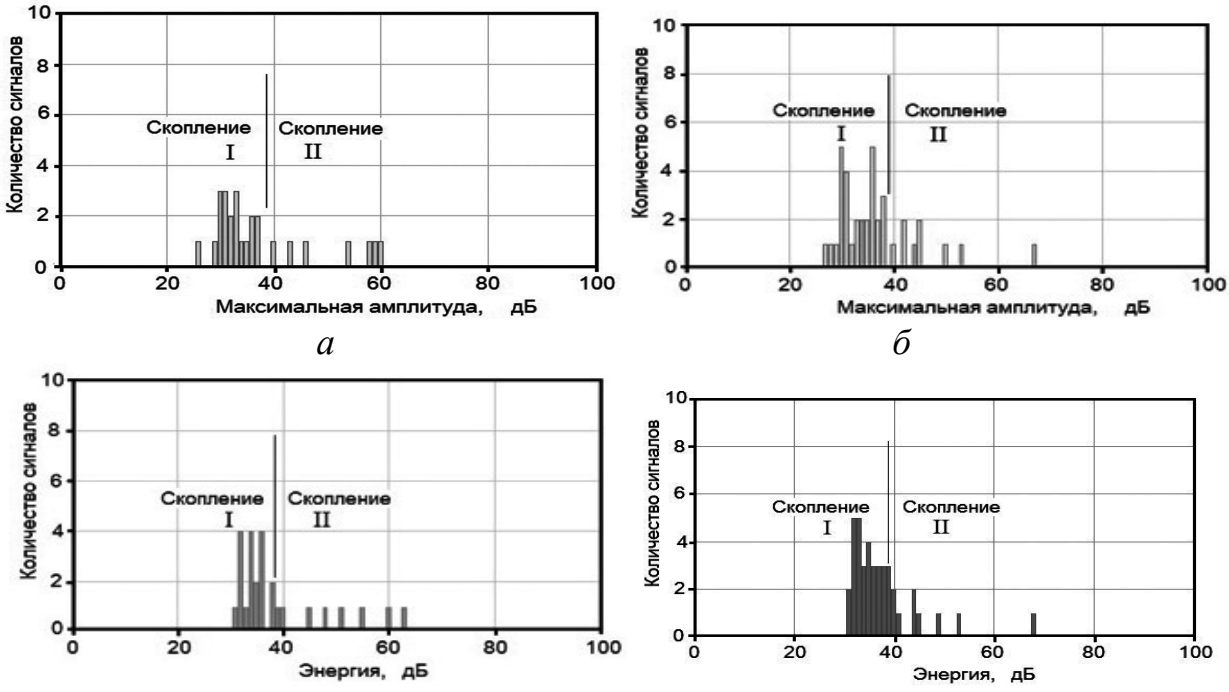
Напряжение σ_E иногда называют истинным пределом упругости. По мере возрастания напряжения (от σ_E до σ_A) начинается движение дислокаций и происходит все более интенсивное их генерирование преимущественно в приповерхностных слоях металла от границ зерен. В интервале напряжений от σ_A до σ_T уже происходит интенсивное размножение дислокаций в приповерхностных и внутренних слоях металла. Возникает остаточная пластическая деформация. Причем, судя по рентгеновским данным, процесс деформации приповерхност-

ных зерен протекает практически мгновенно при достижении порогового напряжения σ_A и возможно за счет прохождения фронта Людерса-Чернова в приповерхностных зернах.

В нашем случае при определении активности сигналов АЭ первый максимум наблюдается при $\sigma \approx 800$ МПа, а второй при $\sigma \approx 1500$ МПа (рис. 1, *а*). В тоже время первый максимум энергии сигналов соответствует $\sigma \approx 1000$ МПа, а второй $\sigma \approx 1500$ МПа, т.е. при таком же напряжении, как и при определении второго пика активности (рис.1 б). Первые и вторые максимумы активности и энергии сигналов АЭ, предшествующие физическому пределу текучести, хорошо вписываются в основные представления о стадийности деформации на стадии микротекучести с пороговыми напряжениями σ_E и σ_A.

Всплески *(пики)* АЭ зарегистрированные на стадии микротекучести при σ_A и σ_T имеют сходные амплитудные и энергетические параметры (рис. 2). Характер распределения сигналов АЭ на точечных диаграммах *число осцилляций – максимальная амплитуда* (рис. 3) позволяет (четко) выделить две группы сигналов: скопление I и скопление II. Граница перехода скопления I в скопление II – это область перегиба диаграммы, которая соответствует значениям амплитуды и энергии сигналов 38 дБ (рис. 2, 3). Анализ осциллограмм и характера распределений спектральной плотности мощности сигналов скоплений I и II позволяет отнести сигналы амплитудой и энергией менее 38 дБ к категории регулярной и непрерывной АЭ, а с амплитудой и энергией более 38 дБ к категории взрывной.

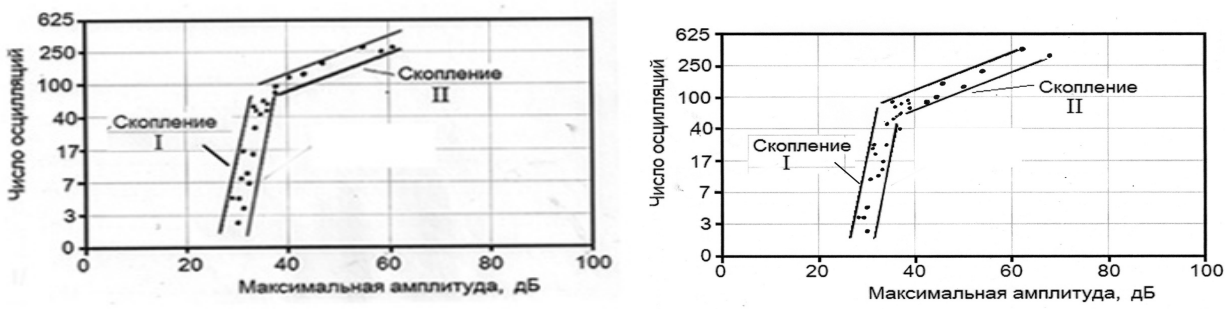
Известно [1], что скопления сигналов I на диаграммах амплитудных и энергетических спектров (рис. 2) связаны с движением и размножения дислокаций, а скопления II – с возможным фазовым превращением. На стадии микротекучести количество сигналов скопления II очень незначительно и в основном преобладают сигналы скопления I, что говорит о малой вероятности протекания фазового превращения. На этой стадии преобладают сигналы непрерывной и регулярной АЭ. Характерные особенности сигналов, относящихся к скоплениям I, приведены на рис. 4, где, для примера, приведена осциллограмма и распределение спектральной плотности мощности сигнала непрерывной АЭ на стадии микротекучести. Рентгеноструктурный анализ показал, что в этом материале на стадии микротекучести не происходит заметного добавочного образования мартенсита деформации.



а *б*

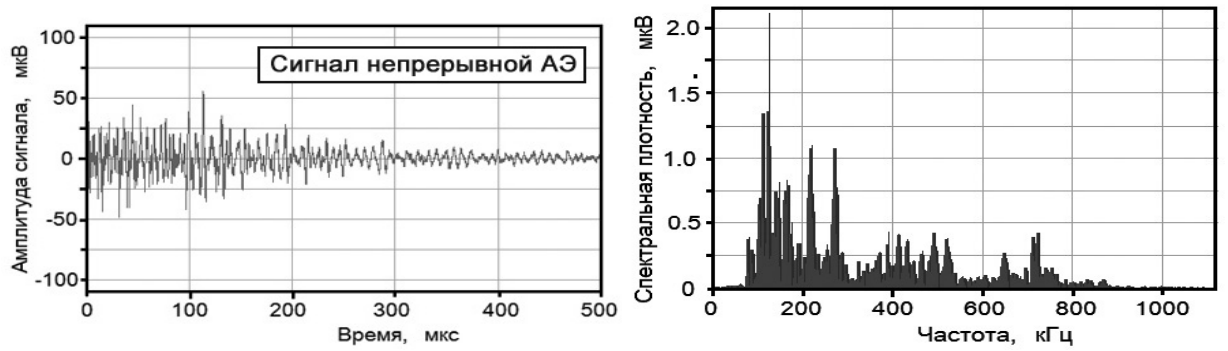
в *г*

Рисунок 2 – Амплитудные и энергетические спектры сигналов АЭ на стадии микротекучести при деформировании до напряжения σ_A (*а*, *в* – соответственно) и от напряжения σ_A до σ_T (*б*, *г* – соответственно)



а *б*

Рисунок 3 – Точечные диаграммы распределения *число осцилляций – максимальная амплитуда* сигналов АЭ зарегистрированных на стадии микротекучести (*а*) и после прохождения площадки текучести ($\varepsilon_т$ = 8%) (*б*)



а *б*

Рисунок 4 – Осциллограмма непрерывной АЭ (*а*) и распределение спектральной плотности мощности типичного АЭ сигнала скопления I (*б*) на стадии микротекучести

Таким образом, можно заключить, что на стадии микротекучести, при преобладании сигналов АЭ группы I, с большей интенсивностью проходят процессы изменения дислокационной структуры (движения и размножения дислокаций) в приповерхностных слоях металла [2, 3]. Использование таких характеристик АЭ, как активность сигналов, средняя энергия импульсов, распределение спектральной плотности мощности АЭ, при изучении механизмов деформации на стадии микротекучести трип – стали ВНС9-Ш позволило с большой вероятностью отождествить наблюдаемые максимумы этих характеристик с пороговыми напряжениями σ_E и σ_A.

Литература

1. Деформация и разрушение материалов / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, А.А. Ашмарин и др. – 2013. – № 12. – С. 19–24.

2. Браун Н. Наблюдения микропластичности // Микропластичность: Сб. тр. – М.: Металлургия, 1972. – С. 37–61.

3. Анализ стадийности деформации трип – стали методом акустической эмиссии / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, В.В. Рощупкин и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 10. – С. 35–41.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-02518а)

Рябченко С.В. Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины,
Середа Г.В. ДП «БЕСТ-БИЗНЕС», Киев, Украина

ШЛИФОВАНИЕ НАПЛАВОК АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ ИЗ РУБИН-КОРУНДА

Шлифование абразивными кругами является наиболее распространенным методом обработки износостойких наплавленных поверхностей высокой твердости. Особое внимание следует уделять выбору абразивных инструментов и технологических режимов шлифования.

Производительность шлифования, себестоимость операции и качество обработки покрытий в значительной степени зависят от характеристик абразивного инструмента. При шлифовании деталей,

восстановленных методами наплавки, применяют шлифовальные круги из электрокорунда на керамических связках. Одним из основных недостатков шлифования кругами из электрокорунда является то, что в зоне обработки развиваются температуры, как правило, превышающие температуры структурных и фазовых превращений обрабатываемого материала. В результате этого на поверхности детали появляются прижоги, происходит разупрочнение поверхностного слоя, формируются растягивающие остаточные напряжения, приводящие к образованию микротрещин.

Перспективным материалом для шлифования наплавленных поверхностей является специальный электрокорунд – хромистый электрокорунд. Благодаря наличию в составе электрокорунда оксида хрома, который придает ему розовый цвет, этот корунд называют рубин-корунд. Рубин-корунд очень эффективен при шлифовании специальных сталей, легированных различными металлами - хромом, никелем, кобальтом и т.д. Имеется информация, что шлифовальные круги из рубин-корунда эффективно применяются при шлифовании износостойких наплавок.

Нами проведено испытание шлифовальных кругов из рубин-корунда при плоском шлифовании износостойких наплавленных поверхностей специальных штампов, в условиях Луцкого завода СКФ. Для испытаний были изготовлены круги размером 250х52х76 R26 A98 40 I/J 7 V C40 (рубин-корунд А98, зернистость по ФЕПА 40, твердость I/J, структура 7, керамическая связка V, максимальная скорость С40 м/с) (рис. 1). Обработка производилась на плоско-шлифовальном станке модели 3Д611. Шлифовалась наплавка из материала CastoDur N 9060 (электрод с рутилово-основным покрытием легированный Cr и W на основе Co).

Рисунок 1 – Шлифовальный круг из рубин-корунда

Испытания показали хорошую производительность обработки при шлифовании износостойких наплавок и отсутствие засаливания круга. Шероховатость шлифованной поверхности изделий соответствовала требуемой чертежу.

Сенють В.Т. Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

РАЗРАБОТКА СВЕРХТВЕРДЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ НИТРИДА БОРА

В промышленном производстве различных изделий постоянно используются материалы с повышенными прочностью, твердостью, износостойкостью, что вызывает определенные трудности при их механической обработке [1]. Данное обстоятельство обуславливает необходимость создания эффективных материалов для режущего инструмента. Существующие композиционные и поликристаллические сверхтвердые материалы (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (cBN) в значительной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к современным режущим инструментам. Управление процессами формирования структуры и свойств исходных шихт на основе различных фаз BN позволяет создавать ПСТМ с требуемыми сочетаниями свойств [2, 3].

Известно, что высокий уровень механических свойств ПСТМ на основе cBN определяется дисперсностью их структуры [4]. По аналогии с тугоплавкими материалами, которые приобретают пластические свойства в нанодисперсном состоянии [5], сверхтвердые материалы, полученные на основе композиций, содержащих нано-, субмикро-, микропорошки cBN, модифицированных тугоплавкими соединениями, также должны обладать улучшенными физико-механическими характеристиками. Поэтому разработка методов получения таких композиций на основе модифицированных порошков BN различного фазового состава является актуальной практической задачей.

Синтез исходных порошков для получения композитов. В качестве основы композиционных материалов и ПСТМ были использованы субмикро- и микропорошки cBN, полученные в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси. Исходные порошки синтезированы из гексагонального нитрида бора (hBN) с использованием различных активаторов и катализаторов фазового превращения последнего в кубическую модификацию. Так, микропорошок cBN размером 4–10 мкм получен в системе BN-Mg; микропорошки cBN с размером основной фракции 2–4 мкм, синтезированы в системе BN-NaN_3; субмикропорошки cBN были получены в системах

Mg-Al-BN и Al-BN. В последнем случае количество вводимой добавки алюминия не превышает 5 мас.%, что позволяет повысить качество и термостойкость порошка.

Модифицирование порошков различных фаз BN с помощью механоактивации. Механоактивация порошков cBN способствует наведению в них дефектной структуры, образованию сколов и «свежих» поверхностей, что положительно сказывается на их спекании и взаимодействии со связующими при термобарической обработке.

Предварительная механоактивация порошков hBN позволила получить наноструктурный многофазный порошок на его основе, в котором наряду с hBN отмечено присутствие фаз BN высокого давления в сильно разупорядоченном состоянии. Последующее спекание активированного порошка BN в условиях высоких давлений и температур позволило получить наноструктурный поликристаллический материал на основе cBN с иерархической структурой.

Химико-термическое модифицирование порошков BN. Высокие дисперсность и удельная поверхность субмикро- и нанопорошков вюрцитного (wBN) и кубического BN предполагают значительное влияние химсостава поверхности таких порошков на процессы их спекания в условиях высоких давлений и температур. В работе проведено модифицирование поверхности порошков wBN и cBN методом химико-термического осаждения, что позволило получать композиционные порошки плотных фаз BN различной дисперсности с необходимым набором свойств.

Так, были получены порошки cBN, модифицированные вольфрамом (W), бором (B), титаном (Ti), алюминием (Al), хромом (Cr), кремнием (Si) и др., а также порошки cBN, модифицированные последовательно двумя элементами–W-B, Ti-B, Al-B. Композиционные порошки wBN и cBN использовали для получения ПСТМ методом термобарического спекания.

Изучены процессы получения субмикро- и микропорошков cBN с использованием различных катализаторов, что позволило варьировать зернистость синтезируемых порошков cBN в широких пределах. Разработаны технологические процессы модифицирования порошков на основе различных фаз BN методами механоактивации и химико-термического осаждения.

Методом термобарического спекания композиционных наноструктурных и микропорошков wBN и cBN получены ПСТМ для получистовой и чистовой обработки закаленных сталей, высокопрочных

чугунов и других труднообрабатываемых материалов. Показана перспективность применения полученных материалов для магнитно-абразивной обработки изделий общего и точного машиностроения.

Литература

1. Твердосплавные инструменты в процессах механической обработки / Под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2014. – 318 с.

2. Технологии производства инструментов с пластинами из наноструктурных сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, В.Т. Сенють, И.В. Валькович, М.Л. Хейфец // Процеси механічноі обробки в машинобудованні. Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2011.– Вип. 10.– С. 88–98.

3. Витязь П.А., Сенють В.Т. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2015. – № 3. – С. 60–76.

4. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014.– 608 с.

5. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. – К.: Наукова думка, 1975. – 315 с.

Ситкевич М.В., Булойчик И.А. Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

АНАЛИЗ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЦИНКОВЫХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ СЛОЕВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Технологической особенностью реализации процессов индукционного термодиффузионного цинкования в сравнении со стандартными процессами ТДЦ является использование циклического нагрева обрабатываемых деталей до температур (порядка 700–800 °С), существенно превышающих температуры стандартных режимов реализации процессов ТДЦ. Реторта в этом случае изготав-

ливается из нержавеющей стали, а применяемая для насыщения смесь содержит значительное количество инертного наполнителя, что предотвращает ее спекание в процессе нагрева. При создании переменного магнитного потока, который пронизывает корпус реторты, а также металлоизделия и насыщающую смесь, находящиеся в ней, возникают вихревые токи. При этом в изделиях из ферромагнитного материала величина вихревых токов в десятки и сотни раз превышает величину токов, индуктируемых в корпусе реторты, выполненном из нержавеющей стали. Вследствие этого большая часть электроэнергии, подводимой к индуктору, поглощается металлоизделиями. При этом изделия разогреваются до температуры 768–910 °С, а корпус реторты – до 300–400 °С. Насыщающая смесь оказывается практически прозрачной для электромагнитного поля и нагревается в основном за счет конвективного теплообмена от корпуса реторты и радиационного нагрева от металлоизделий, находящихся в соприкосновении с ней и подвергающихся постоянному совместному с ней перемешиванию при вращении реторты. Характерной особенностью процесса ТДЦ является формирование интерметаллидных диффузионных слоев на основе цинка обладающих высокими показателями микротвердости (порядка 3360–5250 МПа), а так же повышенной прочностью сцепления с основой за счет реализации диффузионного взаимодействия между насыщающим элементом (цинком) и металлической поверхностью обрабатываемого изделия. Взаимная диффузия протекает в том случае, если разница в диаметрах атомов диффундирующих веществ не превышает 15–16%. Поскольку диаметры атомов железа и атомов цинка приблизительно равны: 0,254 и 0,274 н.м. соответственно, проникновение атомов цинка в решетку железа при высоких температурах происходит достаточно интенсивно. Диффузия цинка может идти не только через объем зерен железа, но и по границам зерен - даже с большей интенсивностью, из-за большего количества вакансий на межзеренных границах основы, где энергия активации атомов естественно повышается. При рассмотрении процессов диффузии следует учесть, что формирование диффузионного покрытия, сопровождается взаимной диффузией цинка и железа (рис. 1). На основании данных, реализация принципа индукционной обработки оказывает положительное воздействие одновременно на три стадии ХТО (стадия 3, 4, 5), что повышает общую эффективность от применения данного фактора интенсификации (табл. 1).

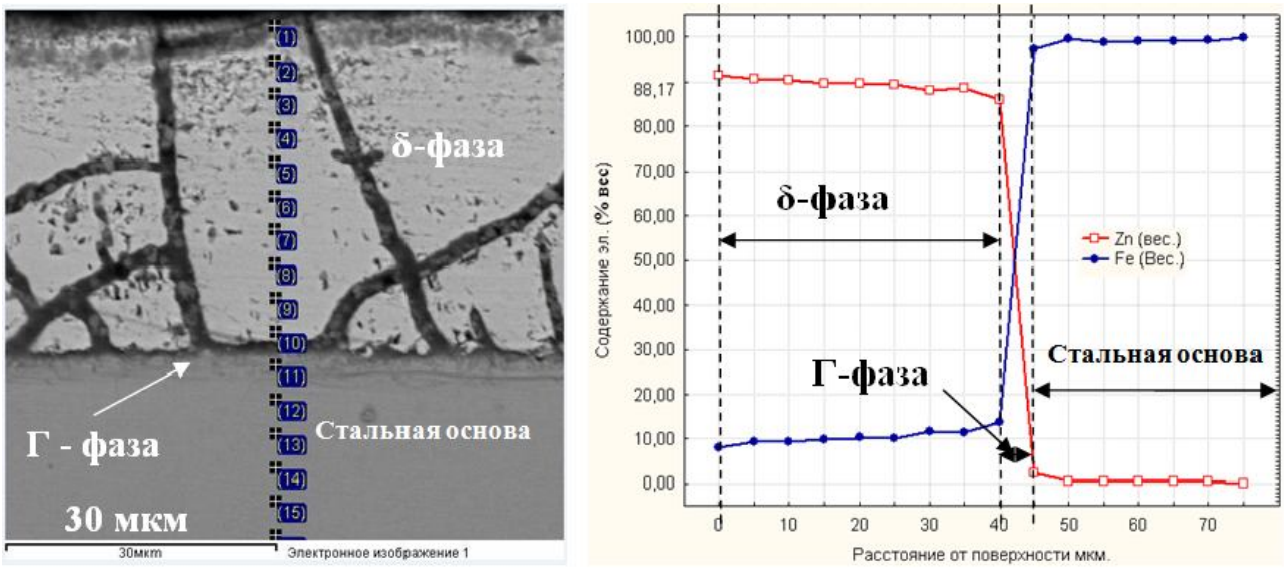


Рисунок 1 – Характер распределения цинка по сечению диффузионного слоя (данные энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии)

Таблица 1 – Элементарные стадии ХТО

Стадия ХТО	Место реализации стадии
1. Реакции в реакционной среде. Образование компоненты, осуществляющей массоперенос диффундирующего элемента	Реакционное пространство, окружающее изделие
2. Диффузия в реакционной среде. Подвод насыщающего элемента к поверхности металла	
3. Реакции на границе раздела фаз. Адсорбция, хемосорбция активных атомов или молекул легирующего элемента насыщаемой поверхностью	На границе раздела: “Насыщающая среда – обрабатываемая поверхность”
4. Диффузия в металле	
5. Реакции в металле образование твердых растворов, химических соединений	В поверхностной зоне металла

Следует отметить, что повышение диффузионной активности может происходить как при формировании цинкового диффузионного слоя за счет высокой скорости нагрева и повышенных температур в зоне реализации диффузионного процесса (700–800 °С), так и в цинковой насыщающей смеси при ее контакте с насыщаемой поверхностью – за счет создания эффекта жидкометаллической фазы. Согласно данным источника, при цинковании в электромагнитном поле происходит формирование цинковых диффузионных сло-

ев с преимущественным формированием δ-фазы, обладающей с точки зрения эксплуатационных свойств оптимальным сочетанием прочности и коррозионной стойкости. Таким образом, в сравнение с традиционными способами формирования цинковых интерметаллидных диффузионных слоев индукционное термодиффузионное цинкование позволяет формировать цинковые диффузионные слои с преимущественным формированием δ-фазы в поверхностной зоне насыщаемого изделия, обладающей наиболее выгодной совокупностью эксплуатационных характеристик (сочетание параметром микротвердости, пластичности и коррозионной стойкости).

Сорокин С.В. Брянский государственый технологический университет, Брянск, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ

Современный этап развития технологии машиностроения заключается в объединении технологий проектирования, изготовления и эксплуатации машин и в разработке научных основ по системному описанию технологических методов, позволяющих обеспечить необходимые эксплуатационные свойства деталей машин.

Технологическая подготовка в современных условиях не может осуществляется без использования средств автоматизации и систем автоматизированного производства (CAD/CAM/CAE-систем). Целью представленной работы является автоматизация процедуры классификации деталей общемашиностроительного назначения в интегрированных САПР и разработка системы проектирования технологических процессов сборки и изготовления изделий методом синтеза для условий современного производства.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- проводится анализ существующих подходов к формализации и автоматизации технологического обеспечения требуемой точности и качества поверхностей деталей машин при сборке и изготовлении;
- разрабатывается методика автоматизации процедуры классификации технических объектов;

• разрабатывается структура универсального программного комплекса классификации деталей, проводится исследование состава и режимов функционирования его основных модулей;
• разрабатываются принципы формализации принятия проектных решений в рамках процесса автоматизации технологического обеспечения требуемой точности и качества поверхностей деталей машин при сборке и изготовлении.

Одним из инструментов решения задач объединения технологий проектирования, изготовления и эксплуатации машин является интегральная автоматизация этапов технической подготовки производства (ТПП) путем построения моделей ее элементов с применением средств вычислительной техники и программного обеспечения [1], в том числе систем искусственного интеллекта.

В настоящее время задачи проектирования деталей машин могут быть решены на качественно новом уровне за счет интеграции процессов автоматизации начальных этапов ТПП с последующим использованием полученных результатов на этапе автоматизированного проектирования с применением интегрированных САПР. Применение этих систем неразрывно связано с CALS-технологиями. В основе CALS лежит использование комплекса единых информационных моделей, стандартизация способов доступа к информации и ее корректная интерпретация на всех этапах жизненного цикла изделия. Поэтому очевидно, что автоматизированное определение параметров качества, эксплуатационных характеристик поверхностных слоев деталей, являясь одной из задач подготовки производства, должно также рассматриваться в контексте применения CALS-технологий.

Технологическая подготовка производства заключается в выборе технологических процессов и их параметров, а также оборудования для проведения этих процессов [2]. Задача технологической подготовки состоит в том, чтобы превратить заготовку в деталь, изображенную на техническом чертеже.

Генеративный подход к разработке технологических процессов состоит в том, что он вырабатывается автоматически на основании технических требований к детали. В технические требования должны включаться подробные сведения о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках проверки, а также графическое изображение формы детали.

В результате анализа проблемы и проводимых в работе исследований по автоматизации технологического обеспечения, требуе-

мой точности и качества поверхностей деталей машин при сборке и изготовлении на основе метода синтеза технологических процессов будет разработана структурная схема, информационное и программное обеспечение автоматизированной системы, реализующей принципы проектирования технологических процессов для современных условий производства.

Современное инновационное производство, широкое использование наукоемких технологий в общем машиностроении, быстрая смена номенклатуры выпускаемых изделий требуют совершенствования работы инженерных служб предприятий. Применение разрабатываемой автоматизированной системы позволит значительно сократить время освоения новой продукции за счет оптимизации работы инженера-проектировщика на начальных этапах технической подготовки производства, при технологическом обеспечении необходимых показателей качества изготавливаемых деталей и сборки узлов.

Литература

1. Модель комплексного анализа размерных связей для обеспечения точности сборочных соединений / Е.А. Польский, Д.М Фильки н // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 5/277 (576). – С. 59–66.

2. Сорокин С.В. Автоматизация синтеза технологических процессов обработки деталей на современном оборудовании с программным управлением // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. –- №2 (53). – С. 119–127.

Сохань С.В., Сороченко В.Г. Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ШЛІФУВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ КУЛЬ ІЗ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Фізична сутність процесу алмазно-абразивної обробки деталей типа «куля» з кераміки може бути сформульована як формоутворення сферичної поверхні деталі переважно її абразивним зношуванням при перекочуванні деталі по поверхні обертового алмазно-

абразивного круга. Тут важливу роль відіграють такі фактори, як фізико-механічні властивості оброблювального матеріалу та зв'язки алмазного інструмента, їх характеристика, траєкторія робочого руху в процесі обробки та ін. умови. Можна констатувати, що технологічними особливостями процесу алмазно-абразивної обробки куль із конструкційної кераміки є необхідність досягнення точності геометричних параметрів при збільшенні продуктивності обробки не менше ніж в 2–3 рази у порівнянні із стандартним процесом, який використовується при виготовленні стальних куль, наприклад, підшипникового призначення. При цьому важливо зазначити, що сферична поверхня одночасно являє собою оброблювальну функціональну і базову (технологічну) поверхню. У зв'язку з цим важливо забезпечити принцип суміщення функціональної і технологічної баз, так як заготовці з вихідною формою (куля, куб, еліпсоїд та ін.) в результаті фасонної обробки надається форма кулі і досягається при цьому необхідна сферичність і шорсткість функціональної поверхні. Необхідно враховувати і ту обставину, що при обробці куль із конструкційної кераміки внаслідок їх високої твердості є достатньо проблематичним забезпечення необхідної високої продуктивності і стійкості робочих дисків, точності оброблених куль. Окрім вказаного, при високопродуктивному алмазному шліфуванні керамічних куль необхідно обробляти заготовки які первісно мають великі відхилення по формі і розмірам (до ±2,00 мм) при одночасній обробці куль у кількості від 3 до 20 штук у залежності від діаметру, який може коливатися від 5 до 100 мм. Величина припуску при цьому може досягати 2,0–3,0 мм при некруглості у межах до 1,0 мм.

Дослідження фізико-механічних закономірностей процесу алмазного шліфування керамічних куль із конструкційної кераміки проводились в технологічних умовах високопродуктивної механічної обробки інструментами із надтвердих матеріалів (НТМ). Використовувалися дослідні випробувальні стенди на базі спеціалізованих куледоводочних верстатів мод. ВШ-Д3 та ВШ-204М, що забезпечують обробку куль діаметром до 45 мм, зусилля притискання куль до 5000 Н, частоту обертання шпинделя 60, 75, 90 та 105 об/хв., застосуванням робочих шліфувальних інструментів діаметром 300 мм, а також алмазних паст, суспензій та мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ. Використовувалися шліфувальні алмазно-абразивні інструменти форми 6А2Т діаметром 300 мм на зв'язці М2-01П зернистістю АС6 125/100, АС6 50/40 та АСМ 28/20 100% концентрації алмаза.

При дослідженні фізико-механічних закономірностей процесу шліфування використовувалися керамічні кулі на основі Si_3N_4, ZrO_2, $Al_2O_3 + ZrO_2$, фізико-механічні властивості яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості керамічних матеріалів

Основа матеріалу	Густина, г/см^3	Пористість		Твердість		Межа міцності при вигині, МПа	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м$^{1/2}$
		загальна,%	відкрита,%	по Віккерсу, ГПа	HRB_{100} (заготовки куль)		
Si_3N_4	3,24	2,42	0,04	15,90	92	830	6,40
ZrO_2	6,09	0,17	0,03	14,30	118	902	11,50
$Al_2O_3 + ZrO_2$	5,04	1,29	0,10	15,40	111	809	7,70

На рис. 1 і 2 наведено схеми модернізації технологічного устаткування змонтованого на базі верстату мод. ВШ-204М, яка включає соосно розміщені верхній і нижній диски, які обертаються. Між цими дисками розташовано сепаратор, який також обертається. В гніздах сепаратора розміщуються заготовки куль, які виступають над поверхнею верхнього диску. Підпружинене в осьовому напрямку до опорної поверхні нижнього диска самовстановлююче притискне кільце розміщено концентрично виконаному обертаючим верхнім диском. Між зовнішньою боковою поверхнею верхнього диска і внутрішньою боковою поверхнею притискного кільця коловий паз для розміщення в ньому виступаючих поверхонь частин куль, які у процесі обробки контактують з обертальним алмазно-абразивним інструментом. Зауважимо, що абразивний інструмент встановлено ексцентрично згаданим дискам. Особливістю даного технологічного пристрою є те, що вона реалізує схему обробки, яка повністю розділяє кінематичні ланцюги, що здійснюють безпосередньо формоутворюючі і переносні рухи від ланцюгів, що здійснюють безпосередньо процес шліфування.. Це дозволяє проводити обробку куль при оптимальних швидкостях шліфування 25–30 м/с і швидкостях переміщення куль 0,15–0,30 м/с.

Робота пристрою, зображеного на рис. 2 відрізняється від роботи пристрою, зображеного на рис. 1 тим, що диски 1 і 2 можуть обертатися з різною частотою відповідно n_1 і n_2. При необхідності можна змінювати також і напрямок обертання згаданих дисків 1 та 2 для забезпечення оптимальних параметрів роботи пристрою.

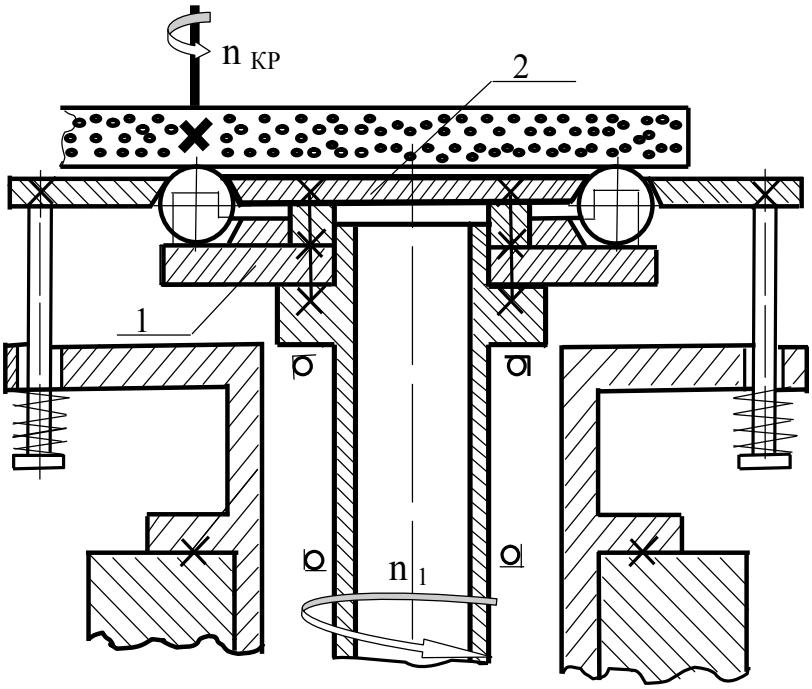


Рисунок 1 – Пристрій для шліфування керамічних куль з кінематично зв'язаними верхнім та нижнім дисками

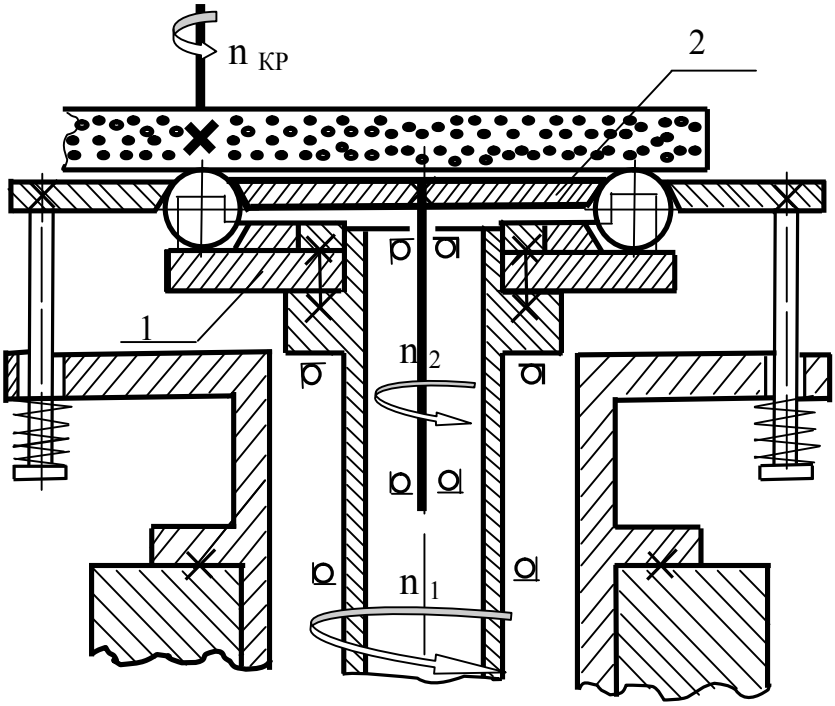


Рисунок 2 – Пристрій для шліфування керамічних куль з кінематично розв'язаними верхнім та нижнім дисками

Таким чином, запропоновані пристрої дозволяють підвищити продуктивність обробки і поліпшити якість виробів за рахунок можливості вибору оптимальних умов шліфування, при цьому вони дозволяють виключити ударні навантаження в процесі обробки і використовувати простий за формою торцевий алмазно-абразивний круг типу 6А2Т.

Виконання притискного кільця самовстановним в осьовому напрямку дозволяє обробляти різнорідні за розміром і такі, що мають некруглу форму заготовки куль, і в той же час забезпечує силове кінематичне замикання заготовок між диском і притискним кільцем.

Важливо також відзначити необхідність встановлення фізико-механічних закономірностей процесу алмазно-абразивної обробки куль, які дозволяють визначати основні кінематичні параметри: швидкість руху куль по функціональній поверхні , швидкість ковзання в зонах контакту кулі з інструментом, розподіл швидкостей ковзання і тисків по зонам контакту та ін. Змінюючи параметри траєкторії, можна в широкому діапазоні управляти процесом формування сітки слідів обробки на поверхні кулі, її рівномірністю і щільністю за рахунок керування положенням власної миттєвої осі обертання куль, а також швидкістю знімання припуску за рахунок зміни величини швидкості проковзування між поверхнями оброблюваної кулі та інструмента.

У табл. 2–4 представлені показники, що характеризують фізико-механічні закономірності процесу алмазного шліфування керамічних куль. Встановлено, що за продуктивністю шліфування (табл. 2) керамічні кулі з досліджуваних матеріалів рівнозначні. При цьому продуктивність шліфування складає від 130 до 2000 мкм/год., що значно перевищує відомі показники. При попередній обробці (табл. 3) продуктивність шліфування складає 25–70 мкм/год. При цьому точність керамічних куль знаходиться в межах 2–3 мкм. Треба зазначити, що така точність не може бути досягнутою для куль з карбіду кремнію, що вірогідно можна пояснити їхньою високою пористістю та утворенням раковин на поверхні куль, що обробляються. Для інших керамічних матеріалів закономірності досягнення точності є встановленими та підтвердженими результатами досліджень безпосередньо прецизійною обробкою куль (табл. 4).

Таблиця 2 – Показники попереднього шліфування керамічних куль з точністю сферичної поверхні менше 10 мкм

Основа матеріалу	Стан обробленої поверхні куль	Продуктивність шліфування, мкм/год.
Si_3N_4	Гранка, пори, раковини	500–2000
ZrO_2	Гранка, пори, раковини	600–1600
$Al_2O_3 + ZrO_2$	Гранка, пори, раковини	130–750

Таблиця 3 – Показники напівчистового шліфування керамічних куль з точністю сферичної поверхні менше 2–3 мкм

Основа матеріалу	Відхилення від сферичності кулі, мкм	Різнорозмірність діаметрів куль, мкм	Стан обробленої поверхні куль	Продуктивність шліфування, мкм/год.
Si_3N_4	6–25	11	раковини і пори на обробленій поверхні кулі	30–60
ZrO_2	1–3	18		25–65
$Al_2O_3 + ZrO_2$	1–3	14		35–70

Таблиця 4 – Показники чистового шліфування керамічних куль з точністю сферичної поверхні менше 1 мкм

Основа матеріалу	Відхилення сферичності кулі, мкм	Різнорозмірність діаметрів куль, мкм	Стан обробленої поверхні куль	Продуктивність шліфування, мкм/год.
Si_3N_4	до 10	до 5	раковини і пори	1–6
ZrO_2	менше 1	до 6	пори	1–5
$Al_2O_3 + ZrO_2$	менше 1	до 5	пори	1–5

При дослідженні фізико-механічних закономірностей процесу шліфування використовувалися керамічні кулі, які були виготовлені партнерами по проекту «GERBALL» компаніями АО «Неомат Ко» (Латвія) та ООО «ВИРИАЛ» (Росія).

Таким чином, виконані експериментальні дослідження на основі системного наукового підходу і оптимізації технологічної системи «процес шліфування – шліфувальні круги – технологічне обладнання – режими шліфування» дозволяють вирішувати науково-технічну проблему механічної алмазно-абразивної обробки куль із керамічних матеріалів, що включає інтенсифікацію процесу шліфування, розробку високопродуктивних технологій і конкурентоспроможних інструментів із надтвердих матеріалів зі спеціальним функціонально орієнтованим робочим шаром, що для інструментального виробництва є ключовим завданням і має пріоритетне значення.

Сохань С.В., Сороченко В.Г. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ВИСОКОПРОДУКТИВНОЇ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ПРЕЦИЗІЙНИХ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ КАРБІДНОЇ КЕРАМІКИ

Високопродуктивні технології механічної обробки інструментами із надтвердих матеріалів сьогодні розглядаються промисловістю як пріоритетний напрямок збільшення продуктивності і якості обробки, а також підвищення надійності продукції. В машинобудівній, інструментальній, нафтовій, газовій, харчовій та інших галузях промисловості впроваджують десятки тисяч механізмів та інструментів, в яких деталі типу «куля» є критично важливими елементами, тому що функціонально забезпечують працездатність механізмів та технологічних систем при великих механічних навантаженнях в умовах екстремального агресивного середовища, абразивної взаємодії та швидкісних навантажень. У зв'язку з цим створення технологічної системи алмазно-абразивної обробки сферичних поверхонь деталей типу «куля» із конструкційної кераміки, зокрема карбідної, яка відзначається високими показниками зносо- та корозійної стійкості, високою твердістю, прецизійністю та високою точністю функціональних поверхонь у порівнянні з базовими, є надзвичайно актуальною і перспективною проблемою. Для інтенсифікації процесів шліфування, які завжди являють собою проблему механічної обробки, особливо, алмазно-абразивної, що лежать в основі створення високих інтегрованих технологій обробки деталей машин, зокрема деталей типу «куля» із карбідної кераміки, необхідно створення нового покоління шліфувальних кругів із надтвердих матеріалів (НТМ) і прогресивних технологічних систем.

Технологічна система – це сукупність функціональних підсистем, об'єднаних інтегральними і локальними взаємозв'язками, ієрархія яких включає систему «верстат – пристрій – інструмент - деталь», підсистему алмазно-абразивної обробки і підсистему керування процесом обробки: шліфувальні круги із НТМ – режими обробки – показники застосування.

Наукова новизна технологічних методів високопродуктивного шліфування полягає в розробці спеціальної кінематики алмазної обробки деталей типу «куля», яка реалізується за допомогою технологічної

системи. Концепція розробленої технологічної системи алмазно-абразивної обробки полягає в регульованій і керованій зміні положення миттєвої осі обертання сферичної поверхні, що досягається кінематикою алмазно-абразивної обробки, яка повністю розділяє ланцюги, які здійснюють формоутворюючі і переносні рухи від ланцюгів, що забезпечують безпосередньо процес шліфування. Створена кінематика реалізується за допомогою оригінальних технологічних пристроїв, алмазно-абразивних кругів і доводочних дисків. Це дозволяє виконувати алмазно-абразивну обробку деталей типа «куля» із конструкційної кераміки діаметром 5–100 мм при оптимальних швидкостях шліфування 25–30 м/с і швидкості переміщення кульок 0,15–0,30 м/с.

Тобто, у відповідності з ГОСТ 27.004-85 «Системы технологические» створена технологічна система процесу прецизійної алмазно-абразивної обробки деталей типа «куля» підшипникового, клапанного, приладового та інструментального призначення представляє собою сукупність нелінійних підсистем, об'єднаних інтегральними і локальними функціональ-ними взаємозв'язками між первинними і вторинними параметрами робочого процесу, ієрархія яких включає комплекс технологічних переходів, способи їх суміщення в часі, і направлені на забезпечення прецизійності сферичних поверхонь порядку 0,4–0,5 мкм і шорсткості поверхні по параметру $Ra \leq 0{,}05$ мкм при досягненні високопродуктивної обробки куль із конструкційної кераміки. Базовою основою створеної технологічної системи є інтегрована технологія механічної обробки різанням, яка базується на прецизійній алмазно-абразивній обробці та органічному сполученні останніх досягнень технології, інформатики та матеріалознавства.

Стахнив Н.Е, Девин Л.Н., Нечипоренко В.Н.
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля
НАН Украины, Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ НА СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

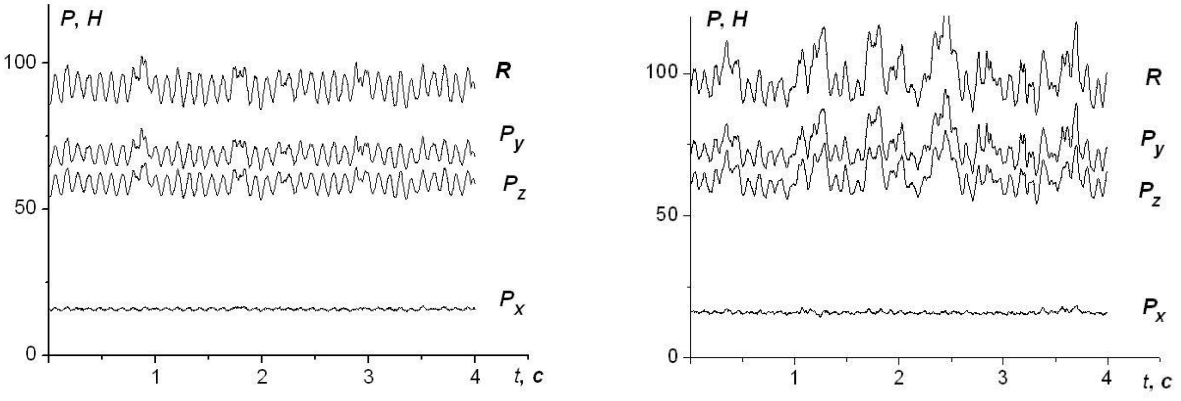
Улучшение качества спекания алмазных порошков для получения ПСТМ достигается введением в них добавок, которые при спекании образуют химические соединения с углеродом и, таким обра-

зом, связывают алмазные частицы. В ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины была установлена принципиальная возможность реакционного спекания нанопорошков алмаза и вольфрама в условиях высоких давлений и температур [1].

Работоспособность резцов из нанокомпозита алмаз–карбид вольфрама изучали на автоматизированном стенде на базе токарного станка с ЧПУ мод. ТПК 125ВМ [2]. Экспериментальные исследования выполняли при чистовом точении образцов из алюминиевого сплава АК6. Режущие пластины из композита «алмаз – карбид вольфрама» с содержанием вольфрама 30% были доводны алмазными микропорошками (шероховатость поверхности *Ra* 0,05–0,08). Резец с механическим креплением круглой режущей пластины диаметром 7±0,025 мм имел передний угол $\gamma = 0°$; задний угол $\alpha = 10°$. Режущие пластины были исследованы при подаче S = 0,1 мм/об, глубине резания t = 0,3 мм и скоростях резания v = 1,0–5,9 м/с.

Составляющие силы резания P_x, P_y, P_z измеряли с помощью динамометра УДМ 100. Сигналы от динамометра через усилитель поступали на АЦП ADA-1406. Управление АЦП ADA-1406 осуществлялось программой Power Graph [3]. Частота опроса АЦП составляла 50 кГц.

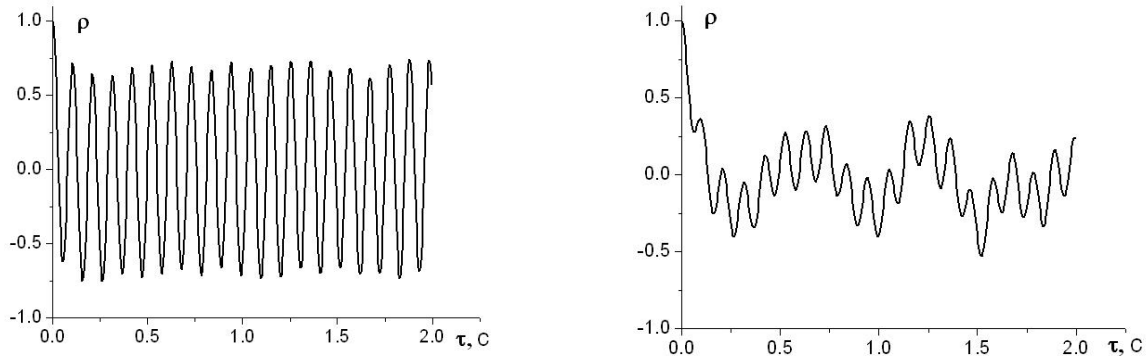
При обработке сплавов алюминия при скорости резания v = 4,9–5,9 м/с наблюдали образование и срывы нароста. Для более глубокого исследования этих процессов на осциллограммах силы резания были выделены такие участки (рис. 1, *б*) и они были сопоставлены с участками, на которых отсутствовал нарост (рис. 1, *а*).



а *б*

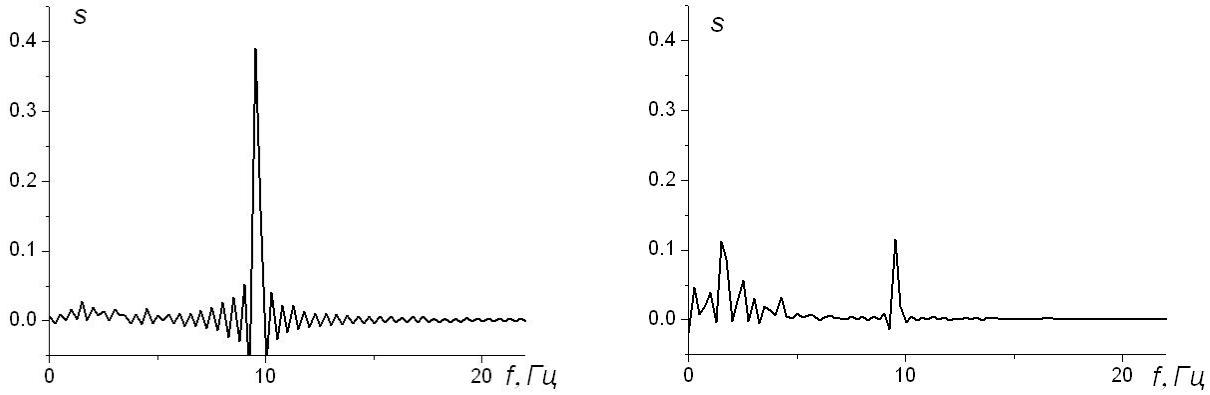
Рисунок 1 – Осциллограммы составляющих P_x, P_y, P_z и равнодействующей R силы резания при v = 5,9 м/с, S = 0,1 мм/об, t = 0,3 мм для участка без нароста (*а*) и с наростом (*б*)

Для равнодействующих сил R резания были рассчитаны автокорреляционная функция (рис. 2); спектральная плотность (рис. 3); спектр (рис. 4)



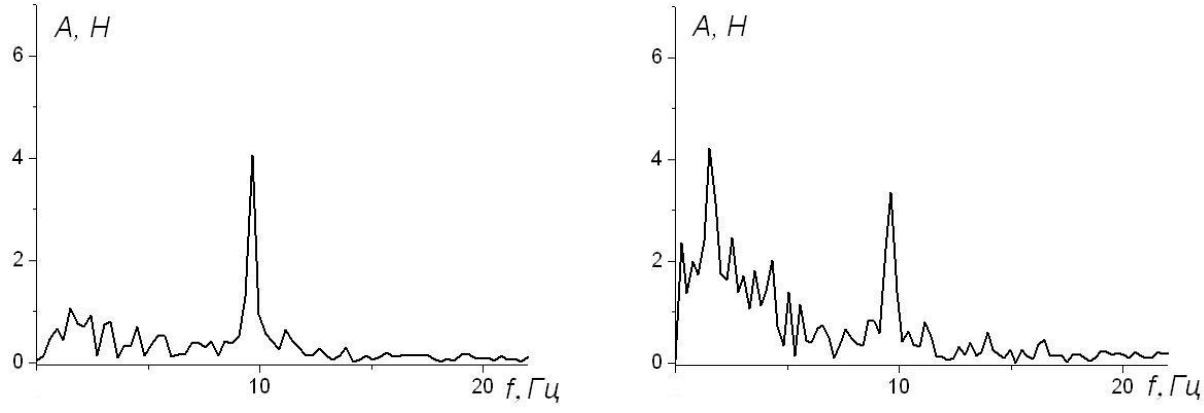
а *б*

Рисунок 2 – Автокорреляционная функция равнодействующей R силы резания при v = 5,9 м/с, S = 0,1 мм/об, t = 0,3 мм для участка без нароста (*а*) и с наростом (*б*)



а *б*

Рисунок 3 – Спектральная плотность равнодействующей R силы резания при v = 5,9 м/с, S = 0,1 мм/об, t = 0,3 мм для участка без нароста (*а*) и с наростом (*б*)



а *б*

Рисунок 4 – Спектр равнодействующей R силы резания при v = 5,9 м/с, S = 0,1 мм/об, t = 0,3 мм для участка без нароста (*а*) и с наростом (*б*)

Для участка, на котором отсутствовало наростообразование характерно изменение автокорреляционной функции по гармоничному закону с незначительными стохастическими смещениями (рис. 2, *а*). А на графиках спектральной плотности (рис. 3, *а*) и спектра (рис. 4, *а*) имеются характерные пики, которые подтверждают преобладание гармонической составляющей.

Как видно из рис. 2, *б* для осциллограммы (рис. 1, *б*), где имели место процессы образования и срыва нароста, характерно изменение автокорреляционной функции со значительными стохастическими смещениями. На графиках спектральной плотности (рис. 3, *б*) и спектра (рис. 4, *б*) видны дополнительные размытые пики, которые подтверждают процесс образования и срыва нароста.

Таким образом, наростообразование в процессе точения алюминиевых сплавов приводит к дополнительному возникновению гармонических колебаний и стохастических возмущений составляющих и равнодействующей силы резания, что может служить диагностическим признаком при выборе оптимальных режимов резания.

Литература

1. Патент на винахід №93803Україна, М. кл.[6] МПК, B24D 3/02, B22F 3/14. Спосіб отримання алмазного композиційного матеріалу / М.В. Новіков, О.О. Бочечка, С.М. Назарчук та ін. – Бюл. – 2011. – № 5.

2. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. – К.: Наук. думка. 1992. – 131 с.

3. Девин Л. Н., Сулима А. Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания // Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД) – 2008. – № 3. – С. 24–26.

Струтинський В.Б., Варченко Т.І., Плахотнюк В.В.
НТУ України «Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ НА ДОВОДОЧНІЙ ОПЕРАЦІЇ

Точні кулі із керамічних матеріалів (нітрид бора, карбід бора) широко використовуються в прогресивних конструкціях деталей

машин. При цьому відхилення від сферичності куль діаметром 30…50 мм не повинно перевищувати 1 мкм. Кулі із кераміки виготовляються методом шліфування із доводкою на спеціальному пристрої. Для контролю якості виготовлення керамічних куль на доводочній операції розроблено спеціальне обладнання та методика вимірів. Обладнання для контролю розміру куль в 25 точках включає в себе точну призму із канавкою утвореною двома площинами, розташованими під кутом 90°. В канавку поміщається керамічна куля. Над канавкою встановлюється плита нахилена під малим кутом по довжині канавки. При цьому площини призми відповідні поверхням, що утворюють канавку та площина плити утворюють трикутний отвір з перетином у вигляді прямокутного трикутника гіпотенуза якого відповідає поверхні плити. При цьому висота трикутника опущена із вершини прямого кута змінюється по довжині отвору з уклоном 1:1000 (10 мкм на 10 мм довжини). Кут нахилу плити регулюється мікрометричними гвинтами, а величина кута контролюється точною кулею з відомим діаметром.

Розроблена спеціальна методика вимірів відхилення форми кулі від сферичності. Згідно даної методики керамічна куля поміщається в трикутний отвір до контакту в трьох точках, одна із яких знаходиться на поверхні плити, а дві другі точки на площинах канавки. Положення кулі по довжині канавки реєструється індикатором з ціною поділки 0,01 мм при діапазоні вимірів 10 мм. При цьому зміни радіуса вписаного в трикутник кола вимірюються з точністю 0,01 мкм.

Використовується спеціальний пристрій маніпулювання призначений для періодичного повороту кулі на кут 45°. По змінам радіуса вписаного в трикутник кола визначається відхилення радіуса кулі в діаметральному перетині. Точкові виміри розміру кулі в 25 точках є основою для побудови математичної моделі реальної поверхні кулі.

Проведено теоретичне обґрунтування контролю геометричних розмірів куль. Для цього побудована математична модель реальної форми кулі. Реальна форма кулі описана рядами, що включають сферичні гармоніки, основними складовими яких є приєднані функції Лежандра першого роду помножені на гармонічні функції. Коефіцієнти рядів знаходяться по виміряним значенням фактичних радіусів кулі визначених в 25 точках. Згідно математичної моделі похибки форми кулі визначені у вигляді хвилястості в меридіональному та в зональному напрямках. Вони визначені у вигляді набору гармонік, що залежать від двох окремо взятих координат введеної

сферичної системи. На поверхні кулі також виділяються ділянки випуклостей і впадин відповідні тессеральним сферичним гармонікам. Набір окремих гармонік подано у вигляді двомірного спектра амплітуд коефіцієнтів рядів.

З використанням спектра коефіцієнтів знаходяться узагальнені показники хвилястості сферичної поверхні. Максимальні різниці амплітудних значень зональних, меридіональних та тессеральних гармонік служать для оцінки відхилення поверхні кулі від сферичності.

Загальне значення відхилення від сферичності знаходяться шляхом знаходження огинальних сфер які визначають максимальні і мінімальні значення радіуса відповідні запропонованій математичній моделі. Для знаходження радіусів огинальних сфер використані методи Монте-Карло.

В результаті проведених досліджень теоретично обґрунтовано метод контролю якості геометричної форми точних керамічних куль.

Струтинський В.Б., Юрчишин О.Я., Полунічев В.А.
НТУ України «Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ПОХИБКИ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ КОНТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ВЕРСТАТАХ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ КІНЕМАТИЧНИМИ СТРУКТУРАМИ

Верстати з паралельними кінематичними структурами мають незначну масу і можуть використовуватись для обробки об’єктів у польових умовах. Недоліками верстатів даного типу є низька жорсткість несучої системи, а відповідно незадовільна статична і динамічна точність обладнання такого типу.

Особливістю верстатів з паралельними кінематичними структурами є можливість компенсації статичних і динамічних похибок програмним комп’ютерним забезпеченням. Для цього необхідна інформація про характер і величину похибок, що мають місце при обробці типових, зокрема контурних поверхонь.

Визначення похибок проведено на основі спеціальних експериментальних досліджень з відповідним математичним описом одержаних результатів.

Особливістю верстатів з паралельними кінематичними структурами є відсутність абсолютної системи декартових прямокутних координат пов’язаної із напрямними або іншими точними поверхнями верстата.

Тому запропоновано ввести абсолютну систему координат пов’язану не із технологічними рухами верстата, а із спеціальною заготовкою, базові поверхні якої визначають абсолютну систему координат. Для підвищення точності визначення координатних площин та вісей координат проведені попередні виміри базових поверхонь заготовки.

Визначення точності верстата з паралельними кінематичними структурами здійснено по результатам вимірів геометричного розташування оброблених на верстаті поверхонь відносно введеної абсолютної системи координат. Оброблено ряд ділянок плоских поверхонь, номінальне положення яких перпендикулярне базовій площині і паралельне відповідно вісям координат x і y. Також оброблені плоскі поверхні, які утворюють кути 30°, 45° та 60° відносно вісей x і y. Оброблено циліндричні поверхні заготовки, концентричні базовій циліндричній поверхні та плоска поверхня паралельна базовій.

В результаті вимірів непаралельності та неперпендикулярності, одержаних після обробки плоских поверхонь заготовки встановлюються відхилення абсолютної системи координат верстата від абсолютної системи координат заготовки. Так визначаються поперечно-кутові відхилення вісей двох систем координат. Плоско-паралельне зміщення вісей встановлюється по вимірах розташування пар оброблених плоских ділянок деталі відносно введених вісей координат заготовки.

Для визначення інтегральних параметрів точності проведено виміри відхилень від круглості та від циліндричності. Оброблено циліндричні поверхні заготовки, концентричні базовій циліндричній поверхні. Проведено виміри відхилення від площинності ряду плоских поверхонь, зокрема плоских поверхонь, паралельних базовій.

Встановлені тенденції формування похибок циліндричних поверхонь. Характерним видом похибок є овальність. Доведено, що напрямки розташування більшого і меншого діаметрів овальної поверхні відповідають головним вісям еліпсоїда жорсткості пружної системи верстата з паралельними кінематичними структурами.

Тимофеева Л.А. Украинский государственный
университет железнодорожного транспорта,
Харьков, Украина

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ ОКСИЛЕГИРОВАНИЯ

Одним из наиболее перспективных путей существенною повышения износостойкости металлов и сплавов является эффект организации структуры и свойств поверхностного деформированного микрообъема под действием внешних условий трения (среды, давления, температуры, скорости относительного перемещения поверхностей, состава и свойств контактирующих материалов, их предварительно направленного изменения), приводящих к явлению избирательного переноса при трении.

Избирательный перенос − это вид контактного взаимодействия при трении, который возникает в результате протекания на поверхности трения комплекса механических и химических процессов, приводящих к возникновению систем автокомпенсации износа и снижения трения.

Наиболее характерной является система образования защитной поверхностной пленки, в которой при трении благодаря определенному структурному состоянию реализуется механизм деформации, протекающий без накопления дефектов структуры, обусловливающих разрушение материала.

Известно, что оксиды металлов оказывают существенное влияние на процесс трения. В условиях трения, под нагрузкой происходит течение в оксидной пленке в результате пластической деформации, что приводит к формированию текстуры в направлении скольжения. При трении происходит упрочнение пленки, о чем свидетельствует повышение ее микротвердости на железоуглеродистых сплавах. Упрочнение оксидной пленки при трении, отсутствие схватывания повышают износостойкость чугуна и стали. Однако, для деталей из железоуглеродистых сплавов, работающих в условиях отсутствия смазочного материала или при ограниченном его количестве, оксидные слои явной защитной роли не выполняют.

Предлагается новый подход к получению покрытий, которые наследуют строение оксидов и состоят из нескольких подслоев, каждый из которых имеет свой индивидуальный состав и структуру,

а, следовательно, и свойства. Влияя на структуру, состав и свойства в отдельности, можно влиять на свойства всего покрытия.

Этот вопрос решили вводом в насыщающую среду химически активных элементов, способствующих изменению состава, структуры и свойств оксидов (оксилегирование). Легирующими могут быть p, d − элементы периодической системы Менделеева с учетом их химическим свойств.

Оксилегирование − это процесс поверхностной обработки железоуглеродистых сплавов под воздействием перегретого пара водных растворов солей с определенной выдержкой и температурой.

При таком воздействии получают модифицированные оксидные покрытия, имеющие слоистое строение, состоящих из сложных оксидов железа и одного или нескольких металлов, входивших в состав соли. При трении сложных но составу покрытий в присутствии различных антифрикционных добавок процессы окисления существенно усложняются. Под действием механических сил − протекают химические реакции между телами, участвующими в трении, и компонентами окружающей среды. Материал покрытия является своеобразным катализатором, вызывающим или ускоряющим процессы обмена между компонентами окружающей среды. В процессе трения образуются вторичные структуры, которые экранируют исходных материал от механических и физико-химических деструкций.

Испытания материалов с модифицированными слоями проводилось в сравнении с оксидными и другими покрытиями.

Исследовались прирабатываемость, задиростойкость, износостойкость, определялось значение коэффициента трения.

Повышение противозадирных свойств покрытия предотвращает схватывание поверхностей трения при кратковременных нагрузках или нарушении режима смазки, т.к. оно содержит в своем составе химически активные элементы: серу, молибден, кислород и др.

При исследовании триботехнических свойств покрытия полученного, оксилегированием выявлено, что в процессе трения имеет место эффект самозалечивания микродефектов поверхности трения, который приводит к ее упрочнению и созданию оптимального субмикрорельефа. Этому способствует слоистое строение поверхностного слоя.

Покрытия со слоистой структурой, благодаря наличию прочных связей между атомами слоя в горизонтальной плоскости и более слабых вертикальной, обеспечивает легкое скольжение тонких слоев друг по другу.

Анализ состава поверхности трения подтверждает наличие химических элементов, которые были в исходном покрытии. Эксплуатационные испытания деталей из железоуглеродистых сплавов, работающих в условиях трения и изнашивания подтвердили, что оксилегирование обеспечивает повышение работоспособности трибосопряжения в 3−4 раза.

Тимофеева Л.А., Воскобойников Д.Г. Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Современная концепция энерго- и ресурсосбережения, принятая на железнодорожном транспорте, в сочетании с высоким уровнем технических требований, предъявляемых к подвижному составу как в условиях существующей, так и перспективной эксплуатации (повышение осевых нагрузок до 30 тс/ось, повышение эксплуатационного пробега вагонов между капитальными ремонтами до 500000 км) обуславливает критерии выбора технологий производства (в том числе и технологий термической обработки) массовых видов металлопродукции.

Это вынуждает при разработке технологических процессов термического упрочнения литых деталей тележки грузовых вагонов учитывать аспекты ресурсосбережения, оптимизировав температурно-временные параметры процессов нагрева под закалку и отпуска, использовать в качестве закалочной среды техническую воду вместо масла, устранив фактор техногенного загрязнения окружающей среды, применять разработанные техпроцессы к серийным углеродистым и низколегированным маркам сталей, не содержащих дорогостоящие легирующие элементы. В частности для производства литых деталей тележки грузового вагона такими серийно выпускаемыми марками стали являются 20ГЛ, 20ФТЛ, 20ГТЛ, 20ГФТЛ.

К числу наиболее быстроизнашиваемых деталей тележек грузовых вагонов следует отнести корпус автосцепки, хомут автосцепки, замок автосцепки, клин тележки фрикционный, плиту упорную, корпус аппарата поглощающего пружинно-фрикционного, корпус буксы.

Для повышения эксплуатационного ресурса литых деталей подвижного состава, работающих при действии циклических нагрузок и подвергаемых в эксплуатации интенсивному износу, необходимо кардинальным образом изменить подход к созданию требуемого комплекса свойств. Для обеспечения высокой циклической долговечности, высокой износостойкости, снижения чувствительности к концентраторам напряжений необходимо создать в упрочняемом сечении литой детали из низкоуглеродистой стали градиент свойств, предусматривающий наличие твердой износостойкой поверхности, вязкой, но прочной сердцевины и сжимающих напряжений в поверхностном слое. Реализация такого комплекса свойств возможна при применении метода объемно-поверхностной закалки.

Принцип метода объемно-поверхностной закалки (ОПЗ) заключается в использовании регулируемой прокаливаемости стали для получения эффекта поверхностного упрочнения деталей при одновременном повышении прочности глубинных слоев и сердцевины изделий. Основными особенностями метода ОПЗ являются:

- детали изготавливаются из сталей, прокаливаемость которых согласована с размерами их нагруженных элементов, либо всего сечения. При необходимости увеличения толщины закаленного слоя в деталях до требуемого уровня, прокаливаемость стали увеличивают за счет небольшого ее легирования (не более 1%) недорогими и недефицитными элементами, как кремний, марганец и хром;
- детали при закалке нагреваются насквозь или достаточно глубоко с тем, чтобы глубина нагрева до надкритических температур превышала необходимую глубину упрочненного слоя не менее, чем в два раза. Оптимальная глубина упрочненного слоя составляет 0,15−0,25 от диаметра упрочняемого сечения детали. При ОПЗ используется интенсивное закалочное охлаждение направленным быстродвижущимся потоком воды или душем, позволяющее в максимальной степени реализовать способность среднеуглеродистных и низколегированных сталей упрочнению;
- для низкоуглеродистых сталей требуемый уровень свойств (градиент прочностных свойств по сечению детали) достигается за один цикл нагрева и охлаждения. Операция отпуска с дополнительным печным нагревом не производится. Интенсивность закалочного охлаждения регулируется таким образом, чтобы процессы самоотпуска поверхностного упрочняемого слоя металла за счет тепла сердцевины обеспечивали требуемый уровень свойств;

• при ОПЗ за один технологический цикл нагрева и охлаждения достигается поверхностная закалка на заданную глубину и максимальную твердость, уровень которой зависит главным образом от содержания углерода в стали, и упрочнение глубинных слоев и сердцевины деталей на структуру тонкой феррито-цементитной смеси (сорбита или троостосорбита закалки). Такое сочетание обеспечивает высокий уровень механических свойств изделий при разнообразных наиболее характерных видах нагружения деталей в эксплуатации.

Известно, что детали грузовых вагонов железнодорожного транспорта должны иметь не только высокие механические характеристики (твердость, ударную вязкость, прочность и др.), но и высокую износостойкость. В этой связи предлагается сочетать термическую обработку (ТО) деталей с химико-термической (ХТО) для формирования на поверхности деталей износостойкого покрытия. С этой целью, после нагрева деталей до заданной температуры и соответствующей выдержки, проводят ее охлаждение в водном растворе солей, содержащих такие химические элементы как: молибден, серу, медь, азот.

Проведение лабораторных испытаний на образцах прошедших ТО и ХТО показало, что износ деталей с нанесенным покрытием в среднем в 2,5 раза ниже, чем у деталей без износостойкого покрытия.

Тимофеева Л.А., Тимофеев С.С., Огульчанская Н.Р.
Украинский государственный университет
железнодорожного транспорта, Харьков, Украина

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Одной из важных проблем современного машиностроения является разработка способов и методов повышения износостойкости, долговечности и надежности деталей машин и механизмов, работающих в сложных условиях трения и изнашивания.

Повышение заявленных свойств деталей обеспечивается: подбором пары трения с минимальным значением коэффициента трения, увеличением твердости одной или обеих сопряженных деталей, созданием на контактной поверхности защитных слоев с требуемой структурой и свойствами, повышением качества чистоты обработки трущихся поверхностей, подбором соответствующей смазки.

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике известно большое количество методов поверхностного упрочнения деталей и применяемого оборудования для их реализации. Наиболее распространенные это методы термической и химико-термической обработки. Применяемое для реализации данных методов обработки оборудование, помимо прочего, имеет ряд общих признаков, а именно рабочее пространство нагревательных печей имеет квадратную, прямоугольную или цилиндрическую форму. Основным недостатком применяемых нагревательных печей является образование окалины, которую в дальнейшем необходимо удалять.

Более совершенным термическим оборудованием, в плане устранения подобного недостатка, являются вакуумные электрические печи. Однако, их применение в серийном производстве затруднено, вследствие их высокой стоимости и необходимости высококвалифицированного обслуживающего персонала.

В научной литературе описаны факты о применении пирамидального пространства и изменения неких свойств объектов под его воздействием, например его влияние на человечески организм, продукты питания, металлические изделия и т.п. Известные утверждения, бесспорно, представляют научный интерес, что в свою очередь предполагает более детальные исследования в этой области.

В этой связи, были проведены исследования влияния пирамидального пространства на коррозионные свойства металлов, а именно образование окалины при термической обработке деталей из железоуглеродистых сплавов при температуре 800−900 ºС. В процессе исследования данного вопроса были изготовлены в одинаковых объемах макеты нагревательных печей имеющих рабочее пространство квадратной, прямоугольной, цилиндрической и пирамидальной форм. В каждое пространство помещались образцы из железоуглеродистых сплавов, предварительно смоченные в воде, в которых находились 10 суток. По прошествии этого было зафиксировано появление коррозии на всех образцах, кроме образцов, находившихся в пирамидальном пространстве.

При использовании нагревательной печи с рабочим пространством пирамидальной формы зафиксировано более быстрое нагревание детали (более чем в 2 раза по сравнению с классическими печами) и уменьшение количества образовавшейся окалины. Так зафиксировано, что при нагреве до 800 ºС в печах с одинаковой садкой металла, время нагрева увеличивается в 2 раза, а количество угара в 2,5 раза больше в сравнении с печью с пирамидальной конфигурацией.

Тимофеева Л.А., Титар Д.Н. Украинский
государственный университет железнодорожного
транспорта, Харьков, Украина

ВЫБОР МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ

Концепция производства деталей транспортного назначения должна предусматривать широкий спектр входных параметров, необходимых для формирования выхода технологической системы в виде конечной продукции требуемого уровня. Это позволит обеспечить гармоничную взаимосвязь создаваемой технологической системы (техпроцесс, оборудование, оснастка) и продукта производства (изделия), осуществляя взаимное корректирование согласно общей цели (конкурентоспособность продукции).

Общий подход к выбору и соответствующей оценке той или иной технологической системы получения деталей транспортного назначения, заключающийся в том, что выбор методов и средств (состав технологической системы) осуществляется на основе определения содержания преобразования начального состояния способа обработки (заготовки) до конечного состояния (деталь) в целях обеспечения повышения конкурентоспособности изделия и рыночной устойчивости технологической системы. Выбор базовых технологий и реализующих их технологических систем должен осуществляться на основе соответствия основным требованиям качества к ним в современных условиях путем обеспечения:

- стабильности заданных функциональных свойств (геометрические, механические, долговечность, надежность, коррозионостойкость, др.);
- качества детали и стабильности ее получения (точность, шероховатость поверхности, волнистость и т.д.);
- гибкости производства (машинная и технологическая);
- малооперационности (ограничение количества операций, переходов и разноименных рабочих мест);
- природоохранности на всех уровнях (экология, безопасность производства, вредность и т.д.);
- экономии всех видов ресурсов (материальных, людских, энергетических, финансовых и других).

Взаимосвязь структуры технологической системы и проектируемого объекта производства осуществляется наличием обратной

связи между параметрами (свойствами) структурных элементов системы (методы, средства и процессы преобразования) через конечное состояние детали с требуемыми конструктивными характеристиками (свойствами) объекта производства. Сформулированный подход оценки качества технологической системы был положен в основу принимаемых научно-технических решений при выборе технологии получения деталей на основе высокоэнергетических методов обработки давлением, обеспечивающих заданные функциональные свойства детали как компонента сложного изделия, который ограничивался условиями согласно принятому подходу. Приемлемость того или иного способа по сути дела определяется указанными параметрами влияния и показателями многофакторной модели функциональной структуры объекта. Значительное количество факторов усложняет системный анализ и выбор оптимального решения традиционными аналитическими методами.

Возможным является вариант выбора при абсолютном выполнении основных условий: стабильность качества, малооперационность; гибкость производства; ресурсосбережение и обеспечение безопасности производства. Это позволяет сократить (химизировать) количество факторов и установить рациональные области (ниши) применения тех или иных методов обработки (технологических систем).

Титаренко В.И., Лантух В.Н. ООО «НПП РЕММАШ», Днепр,
Лендел Ю.Ю., Пилипко В.И, Мудранинец И.Ф.
ПАО «ИЗМСО», Ильница, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПЛАВОЧНЫХ УСТАНОВОК – СОВМЕСТНЫЙ ИТОГ РАБОТЫ ООО «НПП РЕММАШ» И ПАО «ИЗМСО»

Вопрос сокращения текущих расходов на предприятиях всегда актуален для решения вопроса повышения рентабельности любого производства. Особенно он актуален в кризисной ситуации, когда снижение текущих затрат является одним из основных направлений для выживания как отдельных предприятий, так и целых отраслей промышленности.

Одной из основных расходных статей для поддержания жизнедеятельности любого производства являются затраты связанные с ремонтом машин и агрегатов, обеспечение их запасными деталями и узлами.

В вопросе значительного уменьшения этой статьи расходов большую помощь оказывает технология восстановительной и упрочняющей наплавки. Наплавленный металл образует одно целое с основным металлом и связан с ним металлическими связями прочно и надежно. Поэтому наплавка находит широкое применение, как при изготовлении новых деталей, так и при ремонте вышедших из строя. При изготовлении с применением наплавки на рабочую поверхность детали, изготовленной из углеродистой стали, можно нанести сплав, обладающий необходимым для этой детали комплексом свойств – износостойкостью, жаропрочностью, термостойкостью, коррозионностойкостью и др. Наплавка при ремонте позволяет многократно восстанавливать первоначальные размеры вышедших из строя деталей, при этом, правильно выбрав наплавочный материал и технологию можно не только обеспечивать эксплуатационные характеристики на уровне новых деталей, но и даже их превзойти. Так как масса наплавленного металла обычно не превышает нескольких процентов от массы наплавляемой детали, используя восстановительную наплавку, можно многократно восстанавливая изношенные детали, экономить большие средства на их приобретении или металл и затраты на их изготовлении. Используя упрочняющую наплавку при изготовлении деталей можно значительно уменьшить расход дорогостоящих высоколегированных сталей и сплавов.

Кроме этого, увеличивая упрочняющей наплавкой срок службы деталей, узлов и механизмов, от которых зависит работа высокопроизводительного оборудования, мы сокращаем время и количество ремонтных простоев и тем самым повышаем производительность агрегатов и уменьшаем затраты на ремонты. Этим обусловлена большая экономическая и техническая эффективность наплавки в металлургии, горнодобывающей промышленности, на транспорте и в других отраслях промышленности, где большое количество деталей работают в тяжелых условиях, быстро выходя из строя, требуя замены.

Средне приведенные данные эффективности наплавки показывают, что наплавочные технологии, оборудование и материалы позволяют:

• восстановительной наплавкой одного килограмма наплавочного материала заменить приобретение 20–25 кг новых деталей;

• упрочняющей наплавкой одного килограмма наплавочного материала заменить приобретение 60–75 кг новых деталей;
• при упрочнении наплавкой увеличить срок службы деталей в 2–5 раз;
• одной гривной, вложенной в наплавку, получать от 5 до 10 гривен экономии.

Кроме этого наплавка имеет природоохранное и ресурсосберегающее значение, позволяя одним килограммом наплавленного материала экономить:
• 70–100 кг агломерата
• 20–30 кг кокса
• 4–5 кВт электроэнергии
• 6–8 $м^3$ природного газа [1].

Предприятие ООО «НПП РЕММАШ», организованное в 2002 г. на базе лаборатории наплавки и конструкторского отдела НИИ «Черметмеханизация», с первых же шагов своей деятельности выбрало основным направлением работы разработку и изготовление наплавочного оборудования, и в частности станков и установок. Так как общее направление деятельности ООО «НПП РЕММАШ» в области наплавки было продолжением деятельности созданных ранее ЧП «РЕММАШ» (сварочно-наплавочные технологии) и ЧНПКФ «РЕММАШ» (наплавочные материалы), накопленный опыт разработки наплавочных технологий и материалов, а также опыт разработки в рамках НИИ «Черметмеханизация» наплавочного оборудования, стал базой для разработки и изготовления новых наплавочных установок. Наплавочные станки и установки были выбраны, потому что парк подобного оборудования на заводах Украины к 2000 году значительно устарел и износился, а нового подобного оборудования никто не производил, хотя в Украине работало несколько заводов, обеспечивающих комплектацию наплавочного оборудования сварочным и механическим сварочным оборудованием («КЗЭСО» г. Каховка, «СЭЛМА» г. Симферополь, «ИЗМСО» с. Ильница и др.).

В течение первых лет деятельности разработка и изготовление оборудования производились на арендуемой в г. Днепропетровске производственной базе. При этом заказываемое для установок, изготавливаемых в течение первых 3–4х лет деятельности, комплектующее оборудование в основе своей было серийное, но с индивидуальными характеристиками под требования заказчика, оно приобреталось в базовом варианте, а затем производилась его переделка в соответствии с разработанными под заказчика техническими характеристиками. По

такой схеме изготовления были разработаны и изготовлены установки РМ-УСВФ1, РМ-УСВФ2, РМ УН-5, а также выполнена для металлургических заводов модернизация нескольких установок. При такой схеме изготовления терялось много времени и средств. Это послужило толчком к более тесному контакту при изготовлении установок между ООО «НПП РЕММАШ» и ПАО «Ильницкий завод МСО», учитывая, что 50–60% наплавочных установок – это механическое оборудование. В дальнейшем более тесные творческие контакты были также установлены с другими крупными поставщиками комплектующих для наплавочных установок.

Так впервые в 2005 году ООО «НПП РЕММАШ» объединил свои усилия с ПАО «ИЗМСО» при создании установки РМ-10 для наплавки правильных роликов прокатных станов. При этом за РЕММАШ, кроме его торговой марки, была закреплена разработка вместе с заказчиком ТЗ на установку, эскизного и рабочего проекта установки, финансирование изготовления и комплектация покупными изделиями, контроль и при необходимости корректировка на всех стадиях изготовления, испытания, пробная эксплуатация, а за ПАО «ИЗМСО» изготовление основной части механического оборудования, при необходимости его доработка, сборка и монтаж. Такое сотрудничество продолжается уже 10 лет. За это время совместными усилиями было разработано и изготовлено 14 типов установок, некоторые в нескольких экземплярах, а также накоплен большой опыт в организации, разработке и изготовлении сварочно-наплавочного оборудования и определены основные принципы и подходы, которые могут представлять интерес /2/. Они включают в себя следующие основные элементы:

- глубокий анализ аналогов разрабатываемого оборудования;
- использование блочного принципа конструирования, при котором, исходя из технологической задачи, которую должна решать конкретная установка, ее общая конструкция складывается из отдельных блоков («кубиков»), сконструированных ранее. Это позволяет оперативно предложить заказчику эскиз установки, соответствующий его техническому заданию, а затем в сжатые сроки реализовать его в готовую конструкцию;
- максимальное привлечение соразработчиков и соизготовителей, разрабатывающих и изготавливающих отдельные, полностью готовые узлы, из которых складывается установка, что позволяет максимально сократить сроки производства при высоком качестве от-

дельных узлов, изготавливаемых специализирующимся на изготовлении этих узлов предприятиями, и как результат, всей установки в целом;

- придание любой специальной установке функций универсальности, что увеличивает загрузку установок и получаемую от них отдачу;
- максимально возможное оснащение каждой установки технологической оснасткой, что позволяет повысить качество, стабильность, производительность и безопасность при работе на них;
- на базе ранее разработанных типовых установок конкретизация каждой установки под определенного заказчика, что позволяет не приспосабливать установку под номенклатуру заказчика, а сразу, сведя к минимуму время на внедрение, приступать к работе на ней;
- авторский надзор как минимум в течение первого года эксплуатации установок и при необходимости доработка и переделка тех узлов, которые у заказчика вызывают вопросы при эксплуатации;
- проработка и передача заказчику варианта технологии и материалов для износостойкой наплавки для опробования и внедрения на новой установке наряду с принятыми у заказчика технологией и материалами.

Расшифровывая эти основные принципы идеологии разрабатываемых и изготавливаемых установок можно сказать следующее:

Анализ аналогов мы стараемся выполнять не только литературный, но и с ознакомлением с работающими установками, изучением их положительных и отрицательных сторон, при этом стараемся привлечь к этой работе потенциальных заказчиков. Для этого мы поддерживаем деловые отношения с десятками промышленных предприятий Украины.

Использование блочного принципа конструирования мы производим как на базе разработанных и используемых ранее блоков, так и с использованием таких блоков от других разработчиков и изготовителей. Для этого определившись с общей конструкцией установки, мы запрашиваем у всех изготовителей не хватающих нам кубиков блоков и путем выбора лучшего варианта определяем нужных поставщиков.

Привлекать соразработчиков и соизготовителей мы стараемся с активным и осознанным участием их в наших проектах, максимально раскрывая и информируя их, ставя задачу, которую они должны выполнить. При этом мы просим их дать практическую оценку и максимально прислушиваемся к замечаниям и встречным предло-

жениям. Наиболее активными участниками наших проектов являются ПАО «КЗЭСО», ЭМЗ «Фирма «СЭЛМА», ООО «САММИТ» и др. При этом мы всегда в наших информациях отдаем должное вкладу в наш проект всех участников.

Придавать любой установке принцип универсальности, мы начинаем с изучения номенклатуры наплавляемых деталей заказчика, в том числе не только сегодняшней, но и перспективной. Так, к примеру, предложив и оборудовав установки РМ-15, РМ УН-15, РМ УН-5 столами для наплавки плоских деталей, мы позволили включить в номенклатуру наплавляемых на них деталей кроме цилиндрических еще и детали с наплавляемыми плоскими поверхностями, а комплектация этих установок специальными мундштуками для наплавочных автоматов позволили включить в номенклатуру наплавку внутренней поверхности цилиндрических деталей. Обычно такая дополнительная комплектация установок увеличивает их стоимость на 1–2%, увеличивая загрузку на 10–20%, т.е. в целом повышает их эффективность и ускоряет окупаемость.

Оснащение установок РЕММАШ, особенно специальных, технологической оснасткой, предназначенной для относительно узкой номенклатуры деталей позволяет предприятиям, использующим такие установки значительно экономить вспомогательное время, максимально повысить производительность наплавки и сварки, ее стабильность и качество, а также безопасность сварочно-наплавочных работ. Наиболее яркие примеры – это комплектация технологической оснасткой установок РМ-УСВФ1 и РМ-УСВФ2 для сварки воздушных фурм доменных печей, установки РМ-10 для наплавки правильных роликов прокатных станов.

Конкретизация каждой нашей типовой установки под конкретного заказчика может производиться по нескольким причинам. Одной из них может быть такой вариант, когда установка предназначена для одного и того же наименования изделий, но при этом группа этих изделий состоит из нескольких разновидностей, значительно отличающихся конструкцией и размерами. Например установка РМ-9 предназначена для наплавки железнодорожных колесных пар. Даже в базовом варианте, изготовленном для ПАО «Никопольский завод ферросплавов» она была универсальной, рассчитанной на наплавку колесных пар грузовых вагонов и шлаковозов, с буксами и без. Однако очередной заказчик ОАО «Стойленский ГОК» попросил нас расширить возможности установки, с тем, что-

бы на ней можно было наплавлять еще колесные пары мотовозов и автомотрис в сборе не только с буксами, но и с редукторами, что потребовало значительной доработки установки РМ-9 под ОАО «Стойленский ГОК». Другими вариантами изменения какого-то конкретного типа установки является изменение их возможностей по габаритам наплавляемых деталей и их массе, а также изменение их комплектации и др.

Это позволяет не только экономить средства покупателям, заказывая и оплачивая только то что необходимо для выполнения их задач, но и получив установку под свою номенклатуру, максимально быстро ее освоить.

Авторский надзор за изготовленными и работающими у покупателей установками помогает покупателю в быстрейшем их освоении. Кроме этого в течение особенно первого года эксплуатации возникают пожелания по возможным их переделкам с целью более эффективного использования.

Это связано с тем, что довольно часто идя в разрез с классической технологией наплавки какой-то группы деталей, которая заложена в идеологию установки, в процессе ее освоения возникают нестандартные пожелания и предложения по дооснащению либо небольшой переделке установки с целью повышения ее эффективности. И хотя это бывает очень непросто реализовать на предприятия покупателя, мы, если видим действительные преимущества, по возможности идем на это. Так как в результате выиграет и покупатель, повысив эффективность и мы, так как найденное и реализованное новое решение позволит нам в дальнейшем при необходимости его использовать. Такую переделку, например, мы выполнили на установке РМ-9 уже при ее эксплуатации на Стойленском ГОКе, когда по просьбе заказчиков к существующей классической схеме уборки флюса из-под детали с подачей его после просева в флюсобункер для повторного использования добавили систему уборки не расплавившегося флюса с поверхности наплавляемой детали, чаще применяемую при сварке.

Разработка новой технологии наплавки – это то, с чего начинается и заканчивается работа над новой установкой. Начиная работу над установкой, мы закладываем в ее идеологию и технические характеристики базовую технологию, реализовать которую мы должны с помощью комплекса всего оборудования, входящего в комплектацию установки. Заканчивая изготовление, мы испытываем ее

путем наплавки нескольких деталей по базовой заложенной нами вместе с заказчиком технологии с использованием базовых наплавочных материалов. Но при этом мы стараемся раскрыть перед покупателем перспективу использования более современных износостойких наплавочных материалов. Так, к примеру, ОАО «СГОК» заказывая у нас новые установки РМ УН-5 и РМ УН-15 был нацелен на их использование для восстановительной наплавки низколегированными проволоками сплошного сечения. Однако на приемочных испытаниях мы продемонстрировали дополнительно и наплавку упрочняющими порошковыми проволоками. Это стало началом постоянного использования таких материалов.

На фото (рис. 1–4) приведены несколько типовых наплавочных установок, разработанных и изготовленных ООО «НПП РЕММАШ» и ПАО «ИЗМСО».

Рисунок 1 – Установка ИЗРМ-5 для наплавки малогабаритных деталей

Рисунок 2 – Комплекс наплавочного оборудования РМ-12 для наплавки прокатных валков на базе токарного станка

Рисунок 3 – Установка РМ УН-15 для наплавки крупногабаритных деталей (до 15 т)

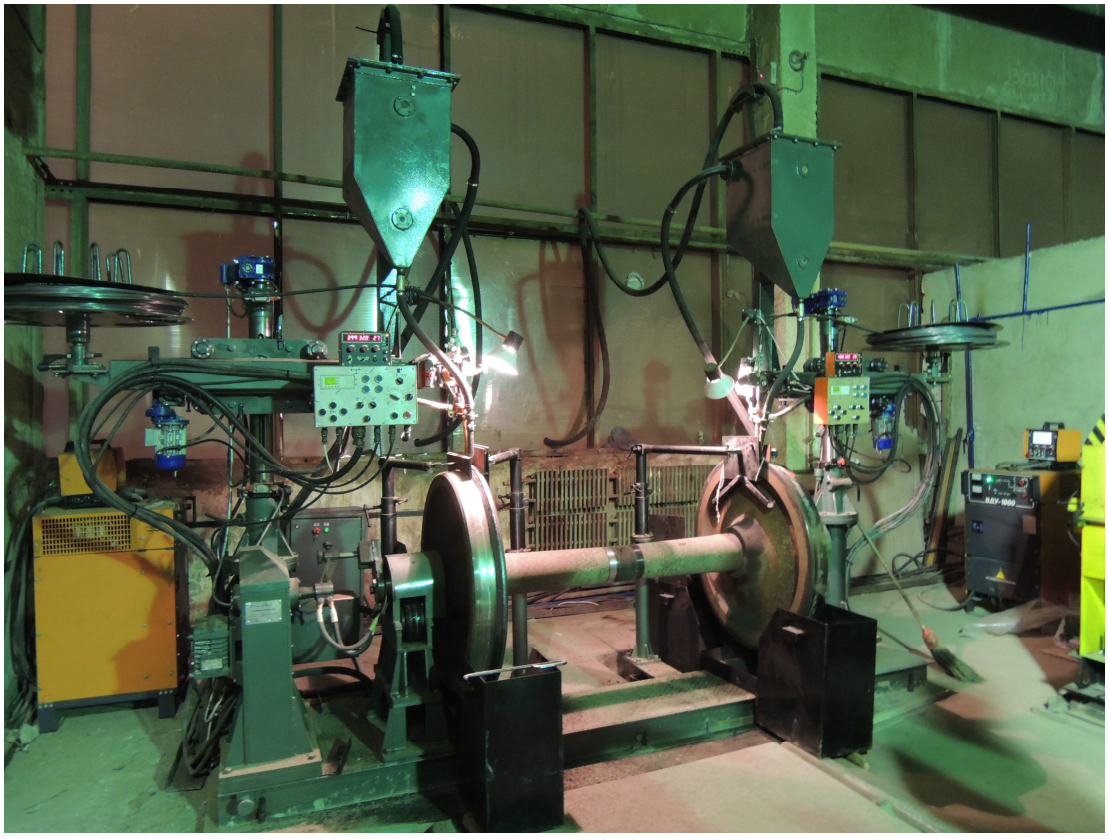


Рисунок 4 – Установка РМ-9 для наплавки гребней железнодорожных колесных пар

Выводы:

Используя изложенные в материалах принципы и подходы к разработке и изготовлению наплавочных установок разработчикам и изготовителям удалось:

- сократить максимум до 6 месяцев время на разработку и изготовление нового типа наплавочной установки, от выдачи заказчиком технического задания на установку до окончания ее изготовления;
- разработать и изготовить за 10 лет 14 новых моделей наплавочных установок.

Литература

1. Наплавочные технологии, оборудование и материалы – эффективный инструмент сокращения расходов на промышленных предприятиях / В.И. Титаренко, А.В. Титаренко, О.В. Ткаченко и др. // Сварщик. – 2009. – № 3 – С. 22–27.

2. Опыт разработки и изготовления сварочно-наплавочных установок / В.И. Титаренко, О.В. Ткаченко и др. // Автоматическая сварка. – 2009. – № 3. – С. 27–30.

Турсунов А.С., Абдуллаева М.А., Тешабаев А.М.
Ферганский политехнический институт, Фергана, Узбекистан

ТРАНСПОРТ, ЭКОЛОГИЯ И ЗДОРОВЬЕ

Как известно транспортно - дорожный комплекс является важным звеном обеспечения транспортных потребностей в экономике и населения, роста бюджетных доходов, улучшения благосостояния людей, и в достижении целей развития тысячелетия, сформулированных в Декларации ООН.

В Узбекистане, по инициативе Президента был принят комплекс мер в секторе транспорта, особенно по развитию отрасли автомобилестроения, дорожно-транспортных коммуникаций, обеспечению безопасности и экологизации транспорта.

В республике достигнуты определенные успехи в разработке и внедрении оптимальной системы движения автотранспорта за счет совершенствования планировки, реализуются мероприятия по

улучшению экологического качества автомобильного топлива, а также перехода автомобилей на сжатый природный газ и др.

Начиная с 1989 г., наблюдается снижение выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта в среднем на 3–5%. В 2007 г. данные выбросы составили около 70% от общего объема загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу [1].

Транспортные процессы относятся к экологически опасным, т.е. к таким, которые приводят к биологическим, механическим и физико-химическим загрязнениям экосистем и наносят экологический ущерб ее составляющим. По продолжительности периода негативного воздействия транспорта на здоровье населения и биоценозы необходимо выделить два вида экологической опасности:

- постоянно присутствующие (хронические)
- краткосрочные (острые).

Постоянно присутствующая экологическая опасность является следствием обычного функционирования транспортного комплекса. Она проявляется в повышении по сравнению уровня загрязнения атмосферы и шума вдоль транспортных магистралей.

Краткосрочная экологическая опасность возникает в аварийных ситуациях. При транспортировке опасных грузов происходит загрязнение атмосферы, воды, почвы, поражение и гибель элементов экосистемы.

Токсичность отработавших газов обуславливается главным образом, содержанием окиси углерода (угарного газа), воздействующего на сердечно-сосудистую систему; оксидов азота, действующих на органы дыхания и образующих фотохимический смог; соединений свинца, вызывающих заболевания дыхательных путей, нарушение нервной и кроветворной систем, особенно у детей [4].

В почвах придорожных полос обнаруживают повышенную, по сравнению с местным геохимическим фоном, концентрацию тяжелых металлов. Содержание кадмия здесь превышало фоновое в 2–3 раза, цинка – в 4–10 раз.

Автомобильные выхлопы обуславливают до 30% общего содержания мелкодисперсных взвешенных частиц. Все это в комплексе оказывает крайне негативное влияние на здоровье населения, особенно в условиях жаркого климата Центральной Азии.

Автотранспортные токсичные вещества действуют на уровне клеток, тканей и органов, вызывая тератогенное, эмбриотоксиче-

ское, нейротоксическое и генототоксичное действие, вызывая хромосомную аберрацию [3].

Опасность заключается в том, что ряд ксенобиотиков вызывают канцерогенное (опухолеобразующее) действие. Главным стимулирующим фактором канцерогенеза является бенз(а)пирен. Канцерогенная эффективность конденсатов отработавших газов бензинового двигателя составляет 9,6%, дизельного автомобильного двигателя – 16,7%, отработанного автомобильного масла – 18%.

За последние десятилетия в развитых странах мира принимаются кардинальные меры по уменьшению экологического риска. Именно поэтому, практически все перспективные экологически чистые автомобили, проектируются под альтернативные виды топлива. Основной упор делается на замещение нефтяного топлива природным газом [2].

На примере одного проекта, рассмотрим загрязнения окружающей среды вдоль автомобильной дороге, где прокладывается водопроводная сеть [5].

Воздействие объекта на атмосферу от транспортных средств при выемке земли и возврате их в траншеи при прокладке труб, т.е. при ведении строительных работ при прокладывании траншей, укладке труб и их сварке. Источниками выделений и выбросов будут экскаватор, бульдозер и сварочный аппарат.

Источник № 1. Выхлопная труба № 1 – от экскаватора.

Источник № 2. Выхлопная труба № 2 – от бульдозера.

Источник № 3. Выхлопная труба № 3 – от сварочного агрегата.

Источник № 4. Неорганизованные выбросы от сварочного аппарата.

Расчетная часть. Выявлены, следующие источники выбросов и выделений:

От работы транспортных средств, при выемке земли и возврате их в траншеи, при прокладке труб, а также сварке труб, гидроизоляция для водопроводной сети, как было сказано источников выбросов № 1–4 (четыре).

Длина водопроводной сети 1250 м. Выбросы вредных веществ в атмосферу предусматривается при прокладывании траншей и закапывании их.

Проведем расчеты для одного источника (рис. 1).

Источник № 1. Выхлопная труба № 1 – от экскаватора. Выбрасываются окись углерода, углеводороды, окись азота, сернистый ангидрид, сажа, альдегиды, свинец и его соединения, бенз(а)пирен.

В качестве топлива используется дизтопливо, расход его составляет для экскаватора – 1638 литра или 1,638 т/год, параметры трубы: D = 0,05 м, H = 2 м, t = 95 °С, B = 712 мм.рт.ст. Время работы 1600 ч/год.

$$M = Q \cdot B, \text{ т/год,}$$

где Q – удельный выброс при сжигании 1 т топлива, берется по таблице. B – расход топлива, т/год. Q окиси углерода = 0,1 т/т; Q углеводородов = 0,03 т/т; Q окиси азота = 0,04 т/т; Q сернистого ангидрида = 0,02 т\т; Q сажи = 0,016 т/т; Q альдегидов = 0,0025; Q свинца и его соединений = нет. Q бенз(а)пирена = 0,00000031 т/т, то есть следы.

$$V = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}05^2}{4} \cdot 1{,}5 = 0{,}0029 \text{ м}^3/\text{с}.$$

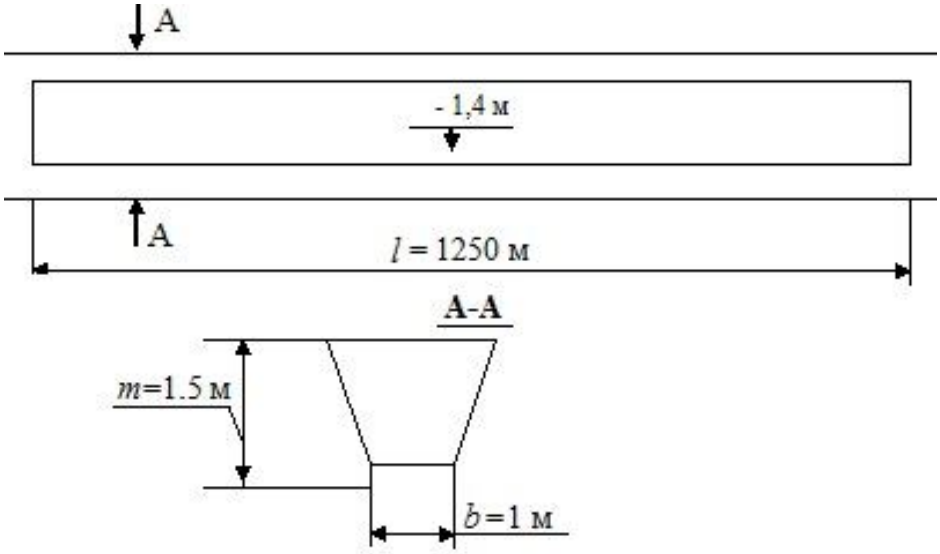


Рисунок 1 – Расчетная схема

Окись углерода:

$$Mco = Qco \cdot B = 0{,}1 \cdot 1{,}638 = 0{,}1638 \text{ т/год,}$$

$$Mco = 0{,}1638/1600 \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-3} = 0{,}1638/5{,}76 = 0{,}0284 \text{ г/с.}$$

$$Q \text{ мг/м}^3 = (0{,}0284/0{,}0029) \cdot 10^3 = 9793{,}1 \text{ мг/м}^3.$$

Перечень вредных веществ поступающих в атмосферу от источников выбросов приведен в табл. 1.

Вышеназванный объект относится 4 категориям воздействия на окружающую среду (локальное воздействие) [5].

Из расчетов видно что при прокладывании водопроводной сети в окружающую среду выделяются следующие вещества: окислы углерода, углеводороды, окислы азота, сернистый ангидрид, сажа, альдегиды, свинец и его соединений, бенз(а)пирена. Если провести расчеты

для других видов автотранспортных средств, то величина выбросов будет значительно больше, приведенных в нашем примере.

Таблица 1 – Перечень вредных веществ поступающих в атмосферу

№ источника	Наименование ингредиента	ПДК максимальная разовая, мг/м^3	Класс опасности	Выбросы, г/сек	Выбросы, т/год
1	Окись углерода	5,0	4	0,0284	0,1638
	Углеводороды	1,0	4	0,0085	0,0491
	Двуокись азота	0,085	2	0,0114	0,0655
	Двуокись серы	0,5	3	0,0057	0,0328
	Сажа	0,15	3	0,0046	0,0262
	Альдегиды	0,04	3	0,00071	0,0041
	Пенза(а)пирен	(ОБУВ) 0,00001	1	Следы	Следы
2	Окись углерода	5,0	4	0,0145	0,0837
	Углеводороды	1,0	4	0,0044	0,0251
	Двуокись азота	0,085	2	0,00581	0,0335
	Двуокись серы	0,5	3	0,0029	0,0167
	Сажа	0,15	3	0,00233	0,0134
	Альдегиды	0,04	3	0,00036	0,0021
	Пенза(а)пирен	0,00001(ОБУВ)	1	Следы	Следы
3	Окись углерода	5,0	4	0,0333	0,192
	Углеводороды	1,0	4	0,01	0,0576
	Двуокись азота	0,085	2	0,0058	0,0768
	Двуокись серы	0,5	3	0,0016	0,0384
	Сажа	0,15	3	0,0053	0,031
	Альдегиды	0,04	3	0,00083	0,0048
	Пенза(а)пирен	0,00001	1	Следы	Следы
4	Марганец	0,005	2	0,000047	0,00027
	Сварочная пыль	0,2	3	0,00031	0,0018
	Итого:			0,146797	0,91867

Как видно, вопросы взаимосвязи окружающей среды и здоровья населения остаются самыми актуальными вопросами по обеспечению экологической безопасности на транспорте. Экологическая опасность напрямую связана с уровнем экологического риска.

Литература

1. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и использовании природных ресурсов в Республике Узбекистан. – Ташкент.

2. Гурьянов Д.И. Экологический чистый транспорт. Направления развития // Инженер, технолог, рабочий. – 2001. – № 2. – С. 12–14.

3. Бочков Н.П., Чеботарев А.Н. Наследственность человека и мутагены внешней среды. – М.: Медицина, 1989. – 5 с.

4. Шадиметов Ю.Ш. Человек: Социально-экологические аспекты здоровья – Т.Узбекистан, 1990. – С. 172–173 с.

5. Проект Заявления о воздействии на окружающую среду (ЗВОС) «Прокладки водопроводной сети от здания Экономического профколледжа находящегося на территории КФЙ «Исфайрамсай» до АЗС, находящейся на территории ШФЙ «Дустлик» в г. Кувасае Ферганской области протяженностью 1,25 км». – Фергана: ФерПИ, 2016. – 36 с.

Федоров В.П. Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия
Анкуда С.Н., Хейфец И.М. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ПРОЦЕССАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Решение актуальных технологических проблем, создание сложных технических объектов, включающее моделирование и управление, невозможно без использования методов *искусственного интеллекта*, направленного на определенные задачи при их специфической алгоритмизации.

Привлечение методов искусственного интеллекта предполагает использование интеллектуального управления, в основе которого лежит идея построения высокоорганизованных систем автоматического управления. Методы искусственного интеллекта основаны на использовании моделей переменной сложности и неопределенности, с выполнением таких интеллектуальных функций, присущих человеку, как принятие решений, планирование поведения, обучение и самообучение в условиях изменяющейся внешней среды.

В последнее время все более широко распространяется построение и исследование моделей процессов в сложных объектах и

способов управления ими на основе имитации реализованных природой механизмов в живых существах, т.е. происходит *биологизация* процессов моделирования и управления. Возможно и совместное применение различных моделей и методов при обработке информации об одном и том же объекте или процессе – в этом состоит сущность *гибридизации*.

Согласие с тем, что любая сколь угодно сложная искусственная модель реального объекта всегда примитивнее и проще оригинала и лишь многоаспектное его изучение с последующей интеграцией получаемых результатов позволит обрести необходимые знания или приблизиться к оптимальному решению, представляет собой основу парадигмы такого подхода.

Сегодня можно с уверенностью констатировать, что биологизация и гибридизация составляют основные тенденции развития систем управления.

Интеллектуальная система управления (ИСУ) – такая система, в которой знания о неизвестных характеристиках управляемого объекта и окружающей среды формируются в процессе обучения и адаптации, а полученная при этом информация используется в процессе автоматического принятия решений для улучшения качества управления.

Необходимый признак ИСУ – наличие базы знаний, содержащей сведения, модели и правила, позволяющие уточнить поставленную задачу управления и выбрать рациональный способ ее решения.

Различным уровням интеллектуальности соответствуют ИСУ, интеллектуальные «в большом» и «в малом».

Интеллектуальные «в большом» – организованы и функционируют в соответствии с пятью принципами:

- взаимодействия с реальным внешним миром через информационные каналы связи;
- открытости системы для повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения;
- наличия механизмов прогноза изменения внешнего мира и собственного поведения системы в изменяющихся условиях;
- наличия многоуровневой иерархической структуры, соответствующей правилу повышения интеллектуальности и снижения требований к точности моделей по мере повышения уровня иерархии в системе;

• сохраняемости функционирования (возможно, с некоторым снижением качества) при разрыве связей или потере управляющих воздействий от высших уровней иерархии.

Интеллектуальные «в малом» не удовлетворяют перечисленным принципам, но используют при функционировании знания как средство преодоления неопределенности входной информации, описания управляемого объекта или его поведения.

Экспертные системы имеют дело с задачами искусственного интеллекта на верхнем уровне, работая с символической информацией для получения выводов об окружающей среде и формирования соответствующих управленческих решений с учетом сложившейся или прогнозируемой ситуации. Они накапливают эвристические знания и, манипулируя ими, пытаются имитировать поведение эксперта.

Экспертный регулятор – это объединение традиционного регулятора (контроллера) и экспертной системы, образующей верхний, супервизорный уровень управления и включающей следующие подсистемы:

• подсистема идентификации и прогноза, обеспечивающая нахождение математической модели объекта по соотношению между его выходными и входными переменными в процессе функционирования;

• база данных, содержащая непрерывно обновляемые предыдущие, текущие, прогнозные данные о характеристиках объекта и внешней среды, а также информацию о граничных значениях соответствующих параметров;

• база знаний, содержащая информацию о специфике работы объекта, целях, стратегии и алгоритмах управления, результаты идентификации и прогноза характеристик объекта;

• подсистема логического вывода, осуществляющая выбор рациональной для данной ситуации структуры и параметров регулятора, а также алгоритмов идентификации и прогноза;

• подсистема интерфейса, организующая интерактивный режим по наполнению базы знаний с участием эксперта (режим обучения) и обеспечивающая общение с пользователем-оператором.

Выполнение функций построения динамической модели объекта и его среды, а также поддержания контакта с внешним миром (датчиками, системами управления базами данных, регулятором) позволяет относить экспертную систему к классу динамических (активных), или экспертных систем реального времени.

Федченко И.И., Мельник Д.Ю. Украинский
государственный университет железнодорожного
транспорта, Харьков, Украина

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Одной из основных задач машиностроения является подъем эффективности производства, его технического уровня и выпуск продукции с высокими качественными показателями. Наращивание производственных мощностей, рост объема производства, совершенствование показателей производительности труда и себестоимости должны неизменно сочетаться с улучшением качества продукции, повышением ее эксплуатационной долговечности и надежности.

При анализе экономической эффективности повышения долговечности деталей транспортного назначения следует учитывать экономию от производства машин на заводе-изготовителе, экономию в масштабах народного хозяйства и экономию при эксплуатации.

Так для анализа и определения эффективности повышения долговечности деталей транспортного назначения определены такие факторы, влияющие на их экономическую эффективность:

1. Для предприятия-изготовителя деталей транспортного назначения: увеличение затрат на изготовление более долговечных и надежных деталей и узлов (по сравнению с существующими); дополнительные издержки на обеспечение и поддержание высокой производственной культуры завода; экономия от снижения брака и ликвидации внутризаводских потерь, обусловленных выполнением гарантийных ремонтов и рекламациями потребителей и др.

2. Для народного хозяйства: улучшение материальных балансов страны и повышение эффективности использования материальных, трудовых и прочих ресурсов в отраслях, производящих эксплуатирующие машины; лучшее использование наличных производственных мощностей машиностроения; снижение потребности в производственных мощностях с экономией капиталовложений в новое строительство либо в реконструкцию действующих предприятий и др.

3. Для предприятия-потребителя деталей транспортного назначения: сокращение необходимого количества деталей и узлов на выполнение определенного объема работ; снижение затрат на выпол-

нение планово-предупредительных и аварийных ремонтов в результате уменьшения их частоты и объемов; повышение ритмичности и других показателей производственного процесса.

Так, затраты машиностроительного завода на повышение долговечности и надежности деталей транспортного назначения, как правило, окупаются за счет экономии при их эксплуатации, повышенной долговечности. Для нахождения соотношений, связывающих экономику производства с экономикой эксплуатации деталей транспортного назначения применяют показатель степени снижения себестоимости единицы продукции при использовании их повышенной долговечности.

Для оценки экономической эффективности от повышения надежности машин и других восстанавливаемых технических устройств автоматических линий можно принять коэффициент надежности, который будет отражать простои машин, связанные с их отказами в работе. Таким коэффициентом надежности может быть коэффициент технического использования, коэффициент готовности и другие согласно гостам. А при проектировании автоматических машин необходимо определять, как часто следует встраивать в линии емкости для обеспечения высокой надежности при минимальных затратах. При этом, сменность работы линии оказывает косвенное влияние: чем больше смен за год работает линия, тем выше расходы по ее эксплуатации.

При ремонте машин часто возникает необходимость определить экономическую эффективность и выбрать способ восстановления детали или замены ее покупной (новой). Выбор способа ремонта деталей можно производить в два этапа: предварительный выбор технологических вариантов, обеспечивающих полное восстановление эксплуатационных свойств детали, и выбор из их числа наиболее экономичного. Выбор наиболее экономичного варианта производится по нескольким показателям или по одному, обобщающему, например относительной себестоимости, т.е. себестоимости восстановления детали, отнесенной к сроку службы детали после ремонта. Также при выборе наиболее экономичного варианта часто пользуются показателем экономической целесообразности и коэффициент эксплуатационной надежности. Показатель экономической целесообразности $К_э$ определяют по формуле:

$$K_э = \frac{C_Н - C_В}{C_Н},$$

где C_H – отпускная цена новой детали по каталогу, $C_в$ – себестоимость восстановления той же детали данным способом ремонта.

Важным при выборе эффективного способа ремонта деталей транспортного назначения учитывают условие рациональности ремонта тем или иным способом, увеличение или уменьшение срока службы сопряженной детали и другие особенности использования машин. Также актуальным остается оценка экономической эффективности от внедрения технологий упрочняющей обработки (способствует износостойкости, повышают коррозионную стойкость, жаростойкость, усталостную прочность и другие эксплуатационные свойства деталей машин) на основе показателя ее экономии, которая позволяет выбрать новые технологии упрочняющей обработки с минимальными затратами.

Таким образом, исследования показывают, что применение современных подходов по оценке экономической эффективности способствует организации контроля на всех этапах производства, эксплуатации и ремонта деталей транспортного назначения.

Филькин Д.М. Брянский государственый технологический университет, Брянск, Россия

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИЗМЫ НА ТОЧНОСТЬ УСТАНОВКИ

Погрешность установки представляет собой отклонение фактически достигнутого положения заготовок от требуемого при их установке в приспособление. Это комплексная погрешность, вызываемая действием различных факторов: непостоянством размеров в партии обрабатываемых заготовок, видом установочных элементов, точности изготовления и сборки этих элементов, непостоянством сил закрепления, параметров качества поверхностного слоя заготовок на базовых поверхностях, износа базовых поверхностей и др.

Погрешности формы и расположения базовых поверхностей установочных элементов оказывают негативное влияние на точность обрабатываемых заготовок. Для оценки этого воздействия и определения составляющих погрешности установки можно использо-

вать теорию размерного анализа. При этом выполняется построение расчетных схем размерных связей конструкций и формирование уравнений размерных цепей

$$T_{\Delta} = \sum_{i}^{n} |c_i| T_{Ai},$$

где T_{Δ} – допуск исследуемой погрешности; c_i – передаточные коэффициенты i-го параметра; T_{Ai} – допуск i-го составляющего параметра точности цепи.

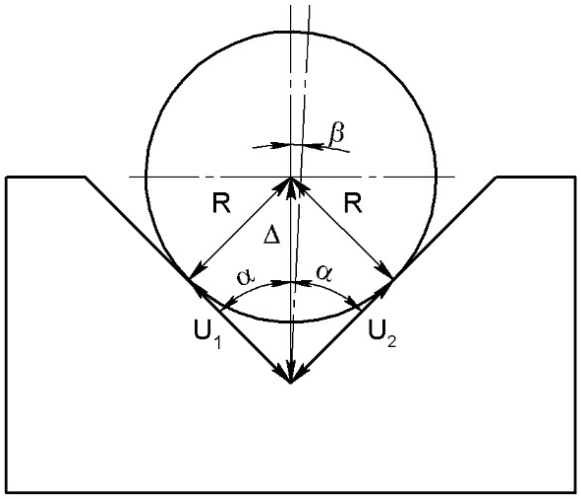


Рисунок 1 – Схема установки заготовки

Рассмотрим схему установки заготовки (рис. 1) радиусом R в призме с учетом углов V-образного паза α и симметричности паза, определяемого углом β.

Система уравнений, определяющая точность установки заготовки в призме формируется цепями двух типов: цепями, формирующими искомые параметры точности базирования ε, и цепями, описывающими самоустановку заготовки в призме. В матричном виде такая система имеет вид [1, 2].

$$[A]\{\delta x\} + [B]\{\delta U\} = \{0\};$$
$$[C]\{\delta x\} + [E]\{\delta U\} = \{\delta V\}.$$

Размерные цепи для представленной схемы описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_1 \cos(90° + \beta + \alpha) + R\cos(\beta + \alpha) + R\cos(\beta - \alpha) + U_2 \cos(\beta - \alpha - 90°) = 0; \\ U_1 \sin(90° + \beta) + \alpha + R\sin(\beta + \alpha) + R\sin(\beta - \alpha) + U_2 \sin(\beta - \alpha - 90°) = 0; \\ U_1 \cos(90° + \beta + \alpha) + R\cos(\beta + \alpha) = \Delta_x; \\ U_1 \sin(90° + \beta + \alpha) + R\sin(\beta + \alpha) = \Delta_y. \end{cases}$$

Решая систему относительно коэффициентов передаточных отношений c_i можно получить следующую модель для определения погрешностей установки заготовок в призме:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{R}{\sin\alpha} & 0 \\ \dfrac{1}{\sin\alpha} & 0 & \dfrac{R\cos\alpha}{\cos^2\alpha - 1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} TR \\ T\beta \\ T\alpha \end{Bmatrix}.$$

Таким образом, допуск угла положения паза призмы β оказывает влияния на точность центрирования $\left(\varepsilon_x = \frac{R}{\sin\alpha} T\beta\right)$. Также полученная модель показывает, что угол α не оказывает влияние на точность центрирования, но при этом влияет на точность базирования вдоль оси y $\left(\varepsilon_y = \frac{R}{\sin\alpha} TR + \frac{R\cos\alpha}{\cos^2\alpha - 1} T\alpha\right)$.

Численные расчеты показывают большое влияние допусков угловых размеров на точность установки заготовок в призмах. В качестве примера рассмотрим базирование заготовок ∅50 в стандартной опорной призме. Значения передаточных коэффициентов в этом случае составят

$$c = \begin{pmatrix} 0 & 70{,}711 & 0 \\ 1{,}414 & 0 & 70.711 \end{pmatrix}.$$

Аналогичным образом можно моделировать влияние погрешности формы базовых поверхностей установочных элементов приспособлений при оценке их точности (рис. 2). Для примера выполнен анализ предыдущей схемы с учетом отклонения от плоскостности базовых поверхностей V-образного паза. Погрешности формы моделируются цилиндрическими поверхностями, фактическая форма которых приводит к дополнительному смещению заготовки.

Размерные цепи для первой схемы описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} a\cos(90° + \beta + \alpha) + b\cos(180° + \beta + \alpha) + r\cos(\beta + \alpha - \varphi_1) + R\cos(\beta + \alpha - \varphi_1) + \\ + R\cos(\beta - \alpha + \varphi_2) + r\cos(180° + \beta - \alpha + \varphi_2) + b\cos(\beta - \alpha) + a\cos(\beta - \alpha - 90°) = 0; \\ a\sin(90° + \beta + \alpha) + b\sin(180° + \beta + \alpha) + r\sin(\beta + \alpha - \varphi_1) + R\sin(\beta + \alpha - \varphi_1) + \\ + R\sin(\beta - \alpha + \varphi_2) + r\sin(180° + \beta - \alpha + \varphi_2) + b\sin(\beta - \alpha) + a\sin(\beta - \alpha - 90°) = 0; \\ a\cos(90° + \beta + \alpha) + b\cos(180° + \beta + \alpha) + r\cos(\beta + \alpha - \varphi_1) + R\cos(\beta + \alpha - \varphi_1) = \Delta_x; \\ a\sin(90° + \beta + \alpha) + b\sin(180° + \beta + \alpha) + r\sin(\beta + \alpha - \varphi_1) + R\sin(\beta + \alpha - \varphi_1) = \Delta_y. \end{cases}$$

После нахождения уравнений передаточных коэффициентов c_i и их упрощения получена следующая модель для оценки точности установки заготовок в призме:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R}{\sin\alpha} & 0 & \frac{1}{\cos\alpha} \\ \frac{1}{\sin\alpha} & 0 & \frac{R\cos\alpha}{\cos^2\alpha - 1} & \frac{1}{\sin\alpha} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} TR \\ T\beta \\ T\alpha \\ T\delta \end{Bmatrix}.$$

Допуски остальных параметров размерной цепи не оказывают значимого влияния на погрешность установки.

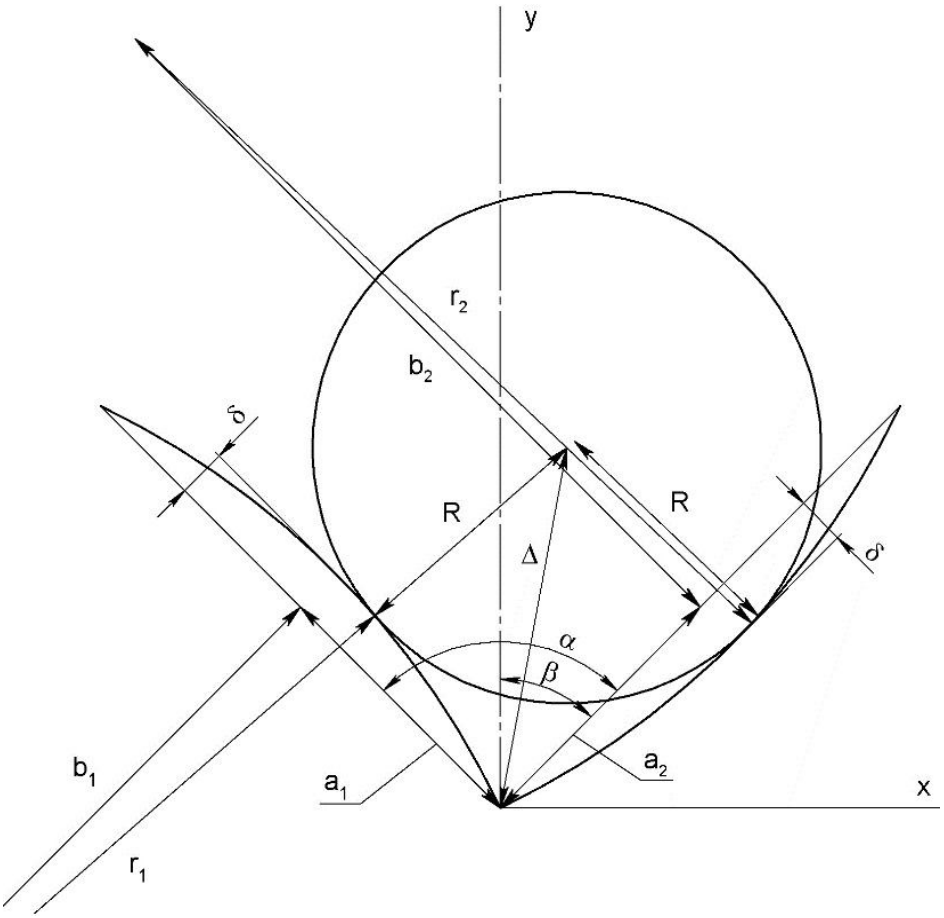


Рисунок 1 – Схема влияние погрешности формы базовых поверхностей установочных элементов приспособлений при оценке их точности

Таким образом, анализ модели показывает, что погрешности формы базовых поверхностей призмы наряду с погрешностями изготовления ее углов оказывают существенное воздействие на точность установки заготовок.

Литература

1. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на этапах жизненного цикла на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации / Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии. – 2014. – № 3. – С. 8–19.

2. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2014. – № 11. – С. 36–43.

Фуніков О.В., Сергійчук І.Ю., Балицька Н.О.,
Ночвай В.М., Яновський В.А., Полонський Л.Г. Житомирський державний технологічний університет, Житомир,
Харламов Ю.О. Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, Сєвєродонецьк, Україна

ВИБІР ГАЗОТЕРМІЧНОГО ПОКРИТТЯ ТА СПОСОБУ ЙОГО НАНЕСЕННЯ

Методи газотермічного напилення відрізняються великим різноманіттям параметрів процесу. Температура напилюваних потоків може бути у діапазоні 200–4200 К та більше; швидкість польоту напилюваних часток варіюється від 30 до 1200 м/с; дистанція напилення – від 5 до 60 мм. Крім того, в різних методах напилення суттєво відрізняються склад напилюваного струменя та робочого середовища, продуктивність за витратами порошку тощо.

Властивості напилених покриттів залежать від великої кількості факторів, кількість яких сягає кількох десятків,що визначається станом напилюваного потоку та напилюваної поверхні деталі. Ці фактори безпосередньо впливають на структуру та властивості утворюваних покриттів: мікроструктуру, міцність зчеплення, пористість, твердість тощо.

Великою є також і номенклатура матеріалів газотермічних покриттів на основі металів та сплавів, інтерметалідів, металевих композитів, керметів і кераміки. В залежності від вихідного матеріалу, його властивостей, технології отримання та методу газотермічного напилення покриття його властивості також можуть варіюватися в широкому діапазоні, наприклад: пористість – 0,5–17,0%; міцність зчеплення – 17–67 МПа; твердість – 0,5–7,6 ГПа; модуль пружності – 23–225 ГПа.

Для вибору ефективного газотермічного покриття необхідно насамперед вибрати критерії, що визначають його працездатність і технологічність. У більшості випадків вибір матеріалу покриття супроводжується і вибором основного матеріалу деталі.

Покриття може ефективно піддаватися крім розмірної та викінчувальної (зміцнювальної) обробки додатковій обробці з метою зміни його структури, пористості, міцності зчеплення тощо. Тому методика вибору матеріалу та технології отримання покриття повинна враховувати і ці фактори. Властивості покриттів у значній

мірі залежать від вихідних матеріалів. Основні види порошків покритті наведені у табл. 1. Типові властивості покриттів подано у табл. 2. З неї видно, що властивості покриттів навіть одного класу значно відрізняються.

Таблиця 1 – Основні порошки для газотермічних напилених порошків

Клас матеріалів покриттів	Порошки	Способи отримання порошків	Способи нанесення покриттів
Метали	Al; Al-Si	РГ	ПН; ХН; ГПН
	Cu; Cu-Ni; Cu-Al	РГ	ВГПН; ПН; ХН; ГПН
	Ti; Ta	РГ	ВПН; ХН
	FeCr; FeCrNiMo	РГ; РВ; П	ПН; ГПН; ДН
	MCrAlY (M = Co, Ni, Fe)	РГ	ПН; ВГПН; ВПН; ДН
	Mo; на основі Mo	СД; КС; ПР	ПН
	Ni; Ni-Cr; Ni-Al	РГ; РВ; П	ПН; ГПН; ХН; ВГПН; ВПН; ДН
Композити	На основі Al-Si	П; С	ПН; ГПН
	На основі CoNi	П	ПН
	На основі Ni	П	ГПН
	Cu-Al	П	ВГПН; ПН
Інтерметаліди	CoCrNiWC;	РГ; РВ	ВГПН; ПН; ДН
	NiCrBSi	РГ; РВ	ГПН; ВГПН; ДН
Кермети	Mo-Mo_2C	КС	ПН
	CrC-NiCr	СД; КС; П; ПР	ПН; ВГПН; ГПН; ДН
	WC-Co; WC-Ni	СД; КС; П; ПР	ПН; ВГПН; ГПН; ДН
Кераміка	Al_2O_3; Al_2O_3-TiO_2	ПД; С	ПН; ГПН; ДН
	Cr_2O_3; Cr_2O_3-TiO_2; Cr_2O_3-TiO_2-SiO_2	ПД; СД; КС; С	ПН; ДН
	TiO_2	ПД	ПН; ГПН
	ZrO_2-Y_2O_3; ZrO_2-MgO	ПД; КС; ПР	ПН

Позначення: РГ – разпилення газом; РВ – распилення водою; СД – спікання з подрібленням; ПД – плавлення з подрібленням; КС – конгломерування зі спіканням; П – плакірування; ПР – плазмове напилення; С – суміші.

Таблиця 2 – Властивості металевих покриттів

Спосіб напилення	Властивості покриттів			
	пористість П, %	міцність зчеплення $\sigma_{сц}$, МПа	твердість Н, ГПа	модуль пружності Е, ГПа
ПН	2,0–13,0; 2,5–17,0	17–66	0,6–7,4	30–225
ВГПН	0,5–5,6	34–64	0,5–7,6	53–282
ХН	0,5–2,0	20–46	0,5–2,5	54–110
ДН	2,0	63–67	3,0	–
ГПН	4,5–6,5	21–41	0,5–3,2	–
ЭДН	5,5	–	0,5–1,6	23–110
ВПН	1,2	–	–	110–218

Працездатність і технологічність покриття залежить від низки груп критеріїв, що показується рівнянням

$$P = f(F_p, F_c, M_p, M_c, P_c, G_p, G_c, Spr, P_{spr}),$$

де F_p – критерії, що враховують призначення та умови роботи деталі; F_c – критерії, що враховують функції покриття; M_p – властивості основного матеріалу деталі; M_c – властивості матеріалу покриття; P_c – параметри покриття; G_p – параметри геометрії деталі; G_c – форма поверхні з покриттями; Spr – метод і режим напилення; P_{spr} – способи наступної обробки покриття.

При виборі ефективних газотермічних покриттів основними критеріями, які необхідно розглянути, є:

1. Службове призначення та умови роботи деталей.
2. Функції покриття.
3. Властивості основного матеріалу.
4. Необхідні властивості покриття на основному матеріалі деталі.
5. Конструктивні особливості деталі та покриття.
6. Розташування та конструктивні особливості поверхні з покриттям.
7. Обмеження з вибору методу напилення та після напилювальної обробки.

Хамдамова Ш.Ш., Мирсалимова С.Р.
Ферганский политехнический институт,
Тухтаев С. Институт общей и неорганической химии
АН Республики Узбекистан, Фергана, Узбекистан

РАСТВОРИМОСТЬ СИСТЕМЫ ХЛОРАТ КАЛЬЦИЯ–НИТРАТ КАЛЬЦИЯ–ВОДА ПРИ 20 °С

Для успешного решения задач по искусственному удалению листьев необходимо иметь концентрированные и комплекснодействующие по действующему веществу высокоэффективные дефолианты, и проблема разработки полифункционально действующих дефолиантов с питательными элементами, низкими нормами расхода и малой токсичностью, из местных сырьевых ресурсов и пригодных для использования отходов производственных предприятий является актуальной проблемой химической технологии и сельского хозяйства.

К основным минеральным элементам, входящим в любую живую клетку, в том числе и в растительную, и играющим существенную роль в метаболизме клетки, относятся N, P, S, K, Mg, Ca, Mn, Cl, Cu, Zn, Mo, Fe, B. Каждый из этих элементов имеет свое назначение, входит в определенные группы органических соединений и влияет на прохождение определенных физиологических процессов и биохимических реакций.

Азот (N) является наряду с C, O, H, основным органогеном, входит в состав аминокислот, азотистых оснований, пигментов, а значит и в состав белков, нуклеиновых кислот, липидов. Это элемент, который влияет на количество строительных компонентов клетки, мембран, пигментов. Его недостаток будет ограничивать количество синтезирующихся белков, нуклеотидов, транспортных, информационных РНК, хлорофиллов, каротиноидов. Этот элемент является определяющим в физиологических процессах биосинтеза белка, фотосинтеза, роста вегетативных органов.

Кальций включается в структуру срединной пластинки клеточной стенки, связывается с кислотными компонентами пектина и образует нерастворимую соль, что определяет плотность полужидкой структуры клеточной стенки. Кальций играет важную роль в регуляции избирательной проницаемости клеточных мембран, определяет механическую прочность клеточных стенок [1, 2].

Объектами исследования являются хлорат и нитрат кальция. Для проведения экспериментов использовали перекристаллизованные из водного раствора двухводный хлорат и четырехводныйнитрат кальция марки «х.ч.». Изучение растворимости солей изотермическим методом [1] проводили путем перемешивания при постоянной температуре растворов исследуемых соединений, сохранением в смеси достаточного количества твердых фаз. Исследование проводили в параболической колбе с мешалкой, помещенной в термостат. Температура в нем поддерживалась терморегулятором и контактным термометром с точностью ±0,1 °С. После установления равновесия отбирали пробы из жидкой и твердой фаз для анализа и определяли место фигуративной точки системы. Состав жидких и твердых фаз устанавливали методами химического анализа. Аналитические данные использовали для определения состава твердых фаз по Скрейнемакерсу. Содержание кальция определяли объемно-комплексонометрическим методом [2], азот методом Кельдаля [3, 4], хлорат ион-объемным перманганатометрическим методом [4].

Для физико-химического обоснования и рекомендации технологии получения дефолиантов на основе хлората и нитрата кальция, а также установления полей кристаллизации исходных компонентов и образующихся соединений необходимы знания растворимости и взаимодействия компонентов при различных условиях. Исследование поставленных задач позволяет выяснить характер химического взаимодействия компонентов, физико-химических свойств растворов и установить оптимальные технологические параметры процесса получения эффективных дефолиантов на основе вышеуказанных компонентов.

С целью дальнейшей разработки технологической схемы нами изучена взаимная растворимость солей в тройной системе изотермическим методом при 20 °С. Равновесие в системе устанавливалось через 1,5–2,0 и 2–2,5 суток соответственно. На основе химического анализа составов жидких и твердых фаз (табл. 1) построена изотермическая диаграмма растворимости системы $Ca(NO_3)_2$-$Ca(ClO_3)_2$-H_2O при 20 °С.

Диаграмма растворимости системы при 20 °С характеризуется наличием двух ветвей кристаллизации твердых фаз: $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$ и $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (рис. 1). Ветвь кристаллизации нитрата кальция значительно больше ветвей хлората кальция. Из изотермической диаграммы растворимости следует, что хлорат кальция при 20 °С в присутствии нитрата кальция понижает свою растворимость, соот-

ветственно, до 65,0%. Тогда как его первоначальная растворимость в воде в указанной температуре составила 67,0%. Это, очевидно, связано с эффектом взаимного высаливания компонентов в системе.

Таблица 1 – Данные по растворимости системы $Ca(NO_3)_2$-$Ca(ClO_3)_2$-H_2O при 20 °С

Номер точки состава	Состав жидкой фазы, масс.%			Состав твердого остатка, масс.%			Твердая фаза
	$Ca(NO_3)_2$	$Ca(ClO_3)_2$	H_2O	$Ca(NO_3)_2$	$Ca(ClO_3)_2$	H_2O	
1	81,0	–	19,0	69,5	–	30,5	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$
2	50,0	20,0	30,0	78,0	2,0	20,0	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$
3	30,0	40,0	30,0	77,0	3,0	20,0	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$
4	21,0	52,0	27,0	76,4	4,0	19,6	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$
5	13,0	65,0	22,0	76,0	5,0	19,0	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$
6	13,0	65,0	22,0	3,6	80,0	16,4	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + $Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$
7	8,0	65,0	27,0	2,0	81,0	17,0	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$
8	4,0	65,2	30,8	0,6	83,0	16,4	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$
9	–	67,0	33,0	–	85,0	15,0	$Ca(ClO_3)_2 \cdot 2H_2O$

Особенностью изотермы растворимости является то, что хлорат-кальция оказывает большее высаливающее действие на нитрат кальция при изученной температуре, чем последний на хлорат кальция. Поэтому, при совместном присутствии в системе растворимость компонентов значительно снижается до эвтонической точки системы. Ветвь кристаллизации гидратированного хлората кальция на изотерме занимает небольшой участок, распо-

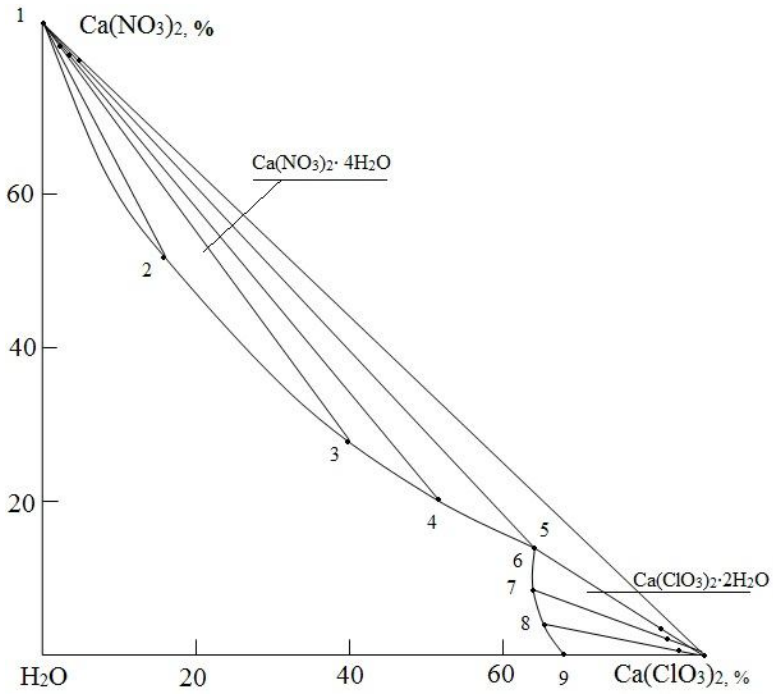


Рисунок 1 – Изотермическая диаграмма растворимости системы $Ca(NO_3)_2$-$Ca(ClO_3)_2$-H_2O при 20 °С

ложенный в пределах 0–13% добавки $Ca(NO_3)_2$, а нитрата кальция – относительно большой участок который простирается между 0–65% содержания хлората кальция при 20 °С соответственно.

Таким образом, на основании изотермической диаграммы растворимости системы $Ca(NO_3)_2$-$Ca(ClO_3)_2$-H_2O можно заключить, что взаимодействием в водной среде между хлоратоми нитратом кальция отсутствует. Система простого эвтонического типа и в ней наблюдается взаимное высаливающее действие компонентов друг на друга. Это указывает на то, что при разработке технологии получения и выборе дефолиирующих составов, необходимо учитывать солевой эффект компонентов системы и выбирать соотношение где имеет минимальное высаливающее действие их друг на друга.

Литература

1. Бергман А.Г., Лужная Н.П. Физико-химические основы изучения и использования соляных месторождений хлорид-сульфатного типа. – М.: АН СССР, 1951. – 232с.

2. Шварценбах Г., Флашка Г. Комплексонометрическое титрование, пер. с нем. – М.: Химия, 1970. – 360 с.

3. Климова В.А. Основные микрометоды анализа органических соединений. – М.: Химия, 1975. – 224 с.

4. TSh 00203855-43:2014 Дефолиант «УзДеф»: Технические условия. – 2014. – 15 с.

Харламов Ю.А. Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Северодонецк, Луганская обл., Украина

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ В ГИБРИДНЫХ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМАХ

Качество поверхностного слоя *КПС* и эксплуатационные свойства деталей машин зависят от множества параметров, характеризующих как геометрию поверхности, так и его физико-химическое состояние

$$КПС = \{ГП(М, В, Ш), ФХСПС(Н, ОН, СФС, ХС, П), О\}$$

где *ГП* – множество свойств, характеризующих геометрию поверхности, в свою очередь состоящее из подмножества свойств, характери-

зующих: макроотклонения *М*, волнистость *В* и шероховатость *Ш; ФХСПС* – множество свойств, характеризующих физико-химические свойства поверхностного слоя (ПС), в свою очередь состоящее из подмножества свойств, характеризующих параметры твердости поверхностного слоя *Н*, остаточные напряжения *ОН*, структуру и фазовый состав *СФС*, химический состав *ХС*, пористость поверхностного слоя; *О* – множество отношений, характеризующих взаимосвязь отдельных свойств ПС. При наличии на поверхности покрытий и пленок следует дополнительно учитывать толщину покрытия, прочность сцепления с основным материалом и физико-химическое взаимодействие материалов покрытия и основного материала.

В настоящее время достаточно подробно изучены и разработаны расчетно-аналитические, экспериментальные и опытно-статистические методы определения значений параметров качества поверхностного слоя, а также средства и приемы их технологического обеспечения. Высокая надежность в достижении требуемых параметров: шероховатости и волнистости обеспечивается тонким точением, макроотклонения – шлифованием, физико-механических свойств – обработкой поверхностным пластическим деформированием (ППД). Все более широкое применение получают упрочняющие технологии: поверхностной термообработки, химико-термической обработки, физико-химических методов обработки, нанесения покрытий и др. Практика современного машиностроения и научные исследования показывают, что технологическое обеспечение высокого качества ПС ответственных деталей машин достигается сочетанием упрочняющей обработки и финишной механической обработки.

На заводах машиностроения и на ремонтных предприятиях требуемое повышение качества ПС в основном решается за счет использования и совершенствования существующих и разработки новых монотехнологий обработки и упрочнения. Однако маркетинговый и технико-экономический анализ классических моно-технологий обработки материалов показал, что они практически приблизились к своему технологическому пределу, практически полностью исчерпали свои ресурсы и возможности для значительного повышения технико-экономических показателей. Создание новых технологических процессов определяется не только необходимостью многократного роста технико-экономической эффективности производства, ресурсо- и энергосбережения для повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции и обновления технологического

уклада, но и новыми технологическими задачами обработки вновь созданных материалов, обладающих уникальными свойствами (высокая твердость, жаропрочность, труднообрабатываемость и др.), задачами обеспечения более высокого качества и достижения инновационных технических характеристик машин и механизмов.

Комплексное объединение (комбинирование) различных источников энергии, видов обработки деталей в единый технологический процесс позволяет в значительной мере нивелировать недостатки монотехнологий и получить новые эффекты, недостижимые при использовании технологий по отдельности. Эффективность комбинированных технологий возникает также за счет снижения потерь времени исполнения операционных процессов путем исключения или сокращения большого числа промежуточных и вспомогательных операций. Перспективным является создание нового класса технологического оборудования носящего разные названия - гибридные станки или комплексированные обрабатывающие системы.

Внедрение гибридных технологических процессов основано на использовании многофункциональных производственных комплексов и соответствует современной тенденции возрастания сложности технологических систем (стремлением к увеличению числа выполняемых функций на одном рабочем месте, усложнению состава и структуры операций и средств технологического оснащения, увеличению числа функциональных модулей в системе управления при интеграции IT технологий и гибкой автоматизации). Такое комплексирование охватывает широкий круг вопросов и задач. Основная задача комплексирования – построение многофункциональных производственных комплексов с автономной работой в гибком машиностроительном производстве. При этом минимизируется количество основного и вспомогательного оборудования, производственных площадей и ресурсов, а также сокращается производственный цикл за счет замены маршрутной технологии комплексом «одного рабочего места» для изготовления деталей «под ключ».

Гибридные станочные системы нынешнего поколения пока единичны, создаются по индивидуальным заказам и не являются характерными для современного технического уклада машиностроения. Пока создание гибридных станков является полем для научных исследований, изобретательства и проведения ОКР. Широкое внедрение гибридных станочных систем в промышленность дает возможность достичь мультипликативных производственных эф-

фектов за счет уникальной синергии свойств средств оснащения комбинированных технологий. Причем одним из перспективных направлений является создание станочных систем, совмещающих операции механической и упрочняющей обработки. Некоторые перспективные комбинации представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Некоторые перспективные схемы создания гибридных станочных систем

Технологическая операция	Метод (операция) инженерии поверхности	Совмещаемые операции и станки
1	2	3
Очистка поверхности	Лазерная очистка поверхности как финишная операция для повышения трибологических и иных свойств поверхности	Токарные, фрезерные, шлифовальные и другие типы металлорежущих станков + лазер или другое устройство для очистки поверхности
	Лазерная поверхностная обработка для подготовки к нанесению покрытий	
	Лазерно-плазменная очистка поверхности от окалины, ржавчины, оксидов, органических и неорганических загрязнений при подготовке деталей к восстановлению в ремонтном производстве, совмещаемая с их механической обработкой	
	Гибридная очистка при комбинации воздействия мощного непрерывного лазера и вторичного действия маломощного импульсного	
	Светолучевая обработка	
	Лазерная поверхностная обработка для подготовки к нанесению покрытий и активации поверхности	Станки для нанесения покрытий газотермическим напылением + устройство для очистки поверхности
	Струйно-абразивная обработка для подготовки поверхности	
	Иглофрезерование для подготовки поверхности	
	Светолучевая обработка для подготовки к нанесению покрытий и активации поверхности	
Модифицирование поверхности термомеханическим воздействием	Лазерное ударное упрочнение	Токарные, фрезерные, шлифовальные и другие типы металлорежущих станков + источники нагрева и инструменты
	Обработка методами ППД с одновременным нагревом поверхностного слоя высококонцентрированными источниками энергии	
	Электромеханическое упрочнение	

Продолжение табл. 1

1	2	3
Модифицирование поверхности механическим воздействием	Обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) – дорнование	Протягивание + дорнование на протяжных станках и прессах
	ППД – накатывание	Токарные, фрезерные, шлифовальные и другие типы металлорежущих станков + устройство для ППД
	ППД – центробежная обработка	
	ППД – чеканка	
	ППД – выглаживание	
	ППД – алмазное выглаживание	
	ППД – дробеструйная обработка	
	ППД – ультразвуковое упрочнение	
	ППД – ударное раскатывание	
	ППД – ударная чеканка	
Модифицирование поверхности термическим воздействием	Пламенная поверхностная закалка	Токарные, фрезерные, шлифовальные и другие типы металлорежущих станков + высококонцентрированный источник энергии
	Поверхностная закалка с контактным нагревом электрическим током	
	Лазерная закалка	
	Лазерные отжиг и отпуск	
	Лазерное оплавление поверхностей сплавов	
	Лазерная аморфизация поверхности	
	Лазерно-плазменное рафинирование поверхностного слоя от серы, фосфора, O_2, N_2, H_2 и т.д.	
	Лазерно-плазменное «залечивание» поверхностного слоя (устранение дефектов в поверхностном слое).	
	Лазерно-плазменная полировка поверхности	
	Плазменная поверхностная термическая обработка	
	Поверхностное упрочнение электрической дугой	
Модифицирование поверхности термодиффузионным воздействием (химико-термическая обработка)	Лазерное или лазерно-плазменное легирование с подачей легирующего состава в зону обработки синхронно с лазерным излучением.	Токарные, фрезерные, шлифовальные и другие типы металлорежущих станков + устройство для легирования
	Плазменная химико-термическая обработка	
	Поверхностное упрочнение сжатой электрической дугой	
	Электроискровое легирование	

Окончание табл. 1

1	2	3
Наплавка	Электродуговая наплавка (ЭДН)	Лезвийная обработка для подготовки поверхности под наплавку + наплавка Лезвийная обработка для подготовки поверхности под наплавку + наплавка + лезвийная обработка наплавленного слоя Наплавка с одновременным фрезерованием и накаткой роликом горячего наплавленного металла. Станки для наплавки.
	Вибродуговая наплавка	
	Лазерная наплавка	
	Плазменная наплавка	
Газотермическое напыление покрытий	Газопламенное напыление	Металлорежущие станки для предварительной обработки + устройства для газотермического напыления + устройства для подготовки и активации поверхности + устройства и станки для обработки покрытий (размерной, термической, упрочняющей и др.)
	Плазменное напыление	
	Детонационно-газовое напыление	
	Электродуговое напыление	
	Холодное напыление	

Создание гибридных станочных систем, интегрирующих устройства для выполнения операций инженерии поверхности, сдерживается их конструктивной сложностью. Однако для них присущи такие свойства, как: модульность, обеспечивающая возможность их реконфигурации; выполнение комплекса противоречивых функциональных и производственных требований к технологической системе; достижение высокого технического уровня автоматизации производственных процессов, уменьшения энергозатрат, сокращение длительности производственного цикла и пр.; надежное обеспечение требуемых свойств поверхностей и др.

Внедрение и более широкое использование гибридных станков, интегрированных с устройствами для упрочняющей и финишной обработки, ограничивается технико-экономическими факторами. Их в первую очередь целесообразно применять в условиях массового и крупносерийного производства ответственных деталей. Однако следует ожидать постепенного повышения их гибкости и целесообразности применения в условиях повышенной номенклатуры производимых деталей.

Харламов Ю.А. Восточноукраинский национальный
университет им. В. Даля, Северодонецк,
Луганская обл., Украина

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Более столетняя история развития газотермического напыления сопровождается созданием все более совершенных техники и технологии. В литературе обычно отмечаются работы выполненные докт. Шоопом с сотрудниками (патенты 1911, 1912 и 1915 годов). Однако эволюция техники и технологии ГТНП сопровождалась появлением новых разработок и изобретений, существенно повышающих технологические возможности метода. Причем наибольший рост их наблюдается с начала 1950-х годов. Анализ показывает, что появление этих разработок и изобретений являются следствием действия законов развития технических систем. создание в 1937 г. материала и технологии напыления износо- и жаростойких покрытий (Colomony's spray and fuse);

Закономерности развития потребностей. Ими было вызвано появление пионерских разработок Шоопа и длительный путь их дальнейшего развития. Например, это создание в 1937 г. материала и технологии напыления износо- и жаростойких покрытий с последующим оплавлением (Colomony's spray and fuse); разработка в 1973 г. метода напыления в динамическом вакууме на химически активные материалы в связи с развитием турбостроения (E. Muchlberger, фирмаElectro-Plasma Inc.). Практически все разработки связаны с удовлетворением возрастающих потребностей машиностроения. Необходимостью повышения качества напыленных покрытий вызвана разработка новых методов напыления: плазменное напыление (1939, Reinecke; 1955, R.M. Gage/Union Carbide); детонационное (1955, R.M. Poorman/Union Carbide); высокоскоростное газопламенное (1982 – JetKote, J.A. Browning; второе поколение – 1989; третье поколение – 1992); холодное напыление (1980, А. Папырин) и др.

Закон полноты частей системы. Система должна быть управляемой. Развитие системы идет в направлении увеличения степени управляемости. Система может быть управляемой тогда и только тогда, когда она содержит в себе элементы способные воспринимать управляющие сигналы, преобразовывать их в управляющие воздействия и адекватно воспринимать информацию о

внутренних изменениях в системе и внешних воздействиях на нее. Развитие систем газотермического напыления непрерывно связано с постепенным решением этих задач в соответствии с потребностями промышленности. Примерами могут быть: разработка в 1925 г. усовершенствованного способа и пистолета для газопламенного напыления (F. Schori, Великобритания); создание в 1938 г. более совершенного пистолета для газопламенного напыления Type E и в 1950 г. пистолета для напыления порошковых материалов (фирма Metco). Потребности в более высокой гибкости регулирования условий формирования покрытий вызывают разработку методов совершенствования даже современных высокоскоростных способов ГТНП, например, вариант холодного напыления с умеренным нагревом (2006, J. Kawakita/NIMS).

Общая тенденция увеличения степени управляемости применительно к системам ГТНП проявляется в переходе от: неуправляемой к управляемой системе (создание более совершенных пистолетов и устройств – 1960 г. – электродуговое напыление, серия плазмотронов F4 фирмы Metco); неавтоматического (ручного) управления к автоматическому, переход от непосредственного управления к дистанционному в связи с роботизацией и защитой персонала, а также использование обратной связи.

Закон увеличения энергетической концентрации проявляется в переходе к высокоскоростным методам напыления – детонационному, высокоскоростному газопламенному, кинетическому холодному и др.

Закон увеличения информационной концентрации проявляется в организации специализированных фирм (1930 – создана первая компания по газотермическому напылению - Metco), издании монографий и журналов (например, Journal of Thermal Spray Technology), организация и проведение национальных и международных конференций по газотермическому напылению и др. Этот закон проявляется в разработке и совершенствовании средств контроля и диагностики состояния напыляемых частиц, например, разработки фирмы Oseir Ltd. (1999 г.) и прибор DPV 2000 (1995, Tecnar Ltd.).

Имеется много примеров разработок, соответствующих законам перехода технических систем в надсистему. Примером закона перехода с макро- на микроуровень является разработка устройств для микроплазменного напыления, конгломерированных порошков из микрочастиц, а также напыление микроструктурных покрытий, например, керамических (2008, Northwest Mettech Corp.).

Необходим более подробный анализ развития систем газотермического напыления в соответствии с законами развития технических систем, который может быть использован для прогнозирования дальнейших разработок.

Чемодуров А.Н. Брянский государственый технологический университет, Брянск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

В целях ускорения научно-технического прогресса страны в сложных условиях необходимо решать задачи быстрого технического перевооружения производства, создания и выпуска машин и оборудования, позволяющих улучшать условия труда и повышать его производительность.

В машиностроении таким оборудованием являются высокопроизводительные металлорежущие станки с числовым программным управлением (ЧПУ), обеспечивающие автоматизацию цикла изготовления деталей с любой конфигурацией. При этом точность, производительность и стоимость обработки заготовок на станках с ЧПУ в значительной степени зависит от технического уровня станочных приспособлений, предназначенных для установки (базирования и закрепления) обрабатываемых заготовок.

Наиболее трудоемкой в изготовлении и дорогостоящей частью технологической оснастки являются станочные и контрольные приспособления, однако их рациональное использование позволяет значительно повысить производительность труда при улучшении эргономических условий и безопасности работ.

Особенности современного производства предъявляют к технологической оснастке достаточно строгие требования. Одним из важнейших эксплуатационных показателей качества приспособлений является надежность, причиной потери которой в большинстве случаев оказывается износ их базовых деталей и сопряжений. При этом наиболее интенсивному изнашиванию подвергаются установочные элементы (опорные штыри, пластины, призмы), которые с целью повышения долговечности традиционно изготавливают из

сталей 20Х, Х12М, У7А, а во многих случаях еще дополнительно подвергают хромированию или наплавке твердым сплавом. Однако указанные мероприятия далеко не исчерпывают современные технологические возможности повышения износостойкости и, к тому же, не всегда оказываются достаточно эффективными.

В этой связи актуальным являются исследования, направленные на решение задач технологического обеспечения и повышения износостойкости и контактной прочности базовых деталей технологической оснастки на основе применения современных методов упрочнения, в частности лазерного легирования, при помощи которых удается управлять физико-механическими свойствами их функциональных поверхностей, исключив применение дорогих высоколегированных сталей.

Следует отметить, что имеющиеся работы по лазерному упрочнению с использованием легирующих компонентов охватывают достаточно широкий круг задач в этой области, при этом почти отсутствуют последовательные рекомендации по выбору составляющих и составов легирующих обмазок, очень мало данных, характеризующих режимы лазерной обработки для конкретных материалов, малоизученными остаются структура и состав получаемых легированных покрытий.

Механизм и технология упрочнения стали лазерным лучом разработаны достаточно полно, поэтому рассмотрим лишь конкретные условия обработки испытываемых образцов.

Упрочняющей обработке лазером (“Квант-18М”) и последующим исследованиям подвергались цилиндрические образцы ∅12 мм (на этапе предварительных испытаний) и опорные призмы технологической оснастки 7033-0035 по ГОСТ 12195-66 (при проведении натурных испытаний), изготовленные из сталей 20, 40Х, 45 и прошедшие типовую термическую обработку.

Способ нанесения композиции перед лазерной обработкой – шликерный, так как обеспечивает экономный расход легирующих элементов и возможность получения в зоне упрочнения большой концентрации легирующего элемента, которая легко регулируется толщиной слоя обмазки. В состав обмазки входили содержащие бор и хром соединения.

Металлографические исследования получаемых покрытий осуществлялись на микроскопах Мим-7 и МБС-2. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3.

Микрорентгеноспектральный анализ осуществлялся на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У.

Для испытаний образцов на контактную прочность использовалась специальная установка ударно-циклического нагружения.

Создание обмазок начиналось с простых двухкомпонентных композиций на основе борного ангидрида (B_2O_3) и оксида хрома (Cr_2O_3). Зависимость микротвердости от содержания в обмазке B_2O_3 позволяет определить наиболее рациональное соотношение данных компонентов для каждой исследуемой стали (рис. 1).

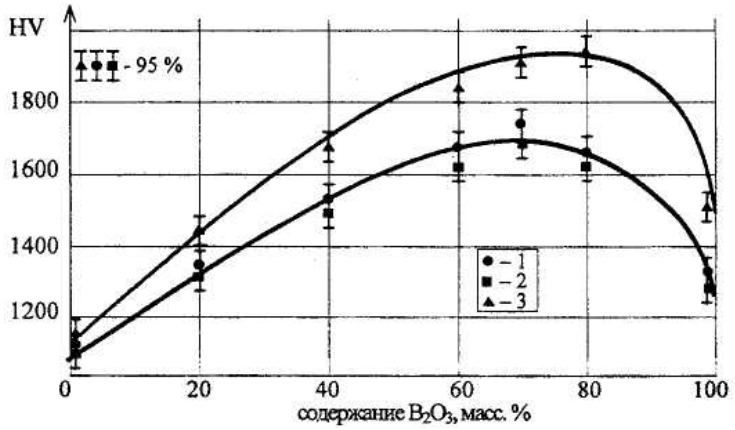


Рисунок 1 – Поверхностная микротвердость лазерных покрытий на основе окиси хрома и борного ангидрида:
1 – сталь 45; 2 – сталь 20; 3 – сталь 40Х

Разработанные двухкомпонентные составы являются базовыми для комплексных обмазок, которые формируются из базовых путем введения дополнительных компонентов, например ферросилиция (FeSi).

Таким образом, микроструктурный и рентгеноструктурный анализ показал, что при лазерном легировании поверхности сталей образуется достаточно однородный слой с эффективной глубиной 0,15–0,20 мм, который представляет собой высокодисперсную структуру с равномерным распределением частиц упрочняющих фаз. Также в процессе импульсного лазерного легирования происходит интенсивное перемешивание материала основы с легирующими компонентами, входящими в состав легирующей композиции.

Кристаллизация ванны расплава протекает с очень высокой скоростью за счет отвода основного количества тепла в металлическую основу после прекращения действия лазерного импульса. Зона легирования представляет собой структуру эвтектического типа с равномерным распределением частиц избыточных фаз.

При лазерном легировании сталей в поверхностном слое возможно образование достаточного количества твердых частиц (карбидов, боридов, интерметаллидов), способных принимать на себя нагрузку при трении. Однако в процессе формирования структуры слоя, твердые растворы, играющие роль матрицы, также значительно уп-

рочняются. При этом необходимо учитывать, что условия формирования таких твердых растворов значительно отличаются от традиционных и, следовательно, традиционные закономерности в данном случае могут быть неприемлемы. Поэтому прогнозировать эксплуатационные свойства слоев лазерного легирования необходимо экспериментальным путем, устанавливая связь свойств со структурой.

Щербаков В.Г., Астрашаб Е.В. Белорусский
национальный технический университет,
Минск, Беларусь

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ДИФФУЗИОННОЕ БОРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Борирование – процесс химико-термической обработки (ХТО), при котором происходит диффузионное насыщение поверхности бором. Борирование позволяет получать на поверхности детали защитный слой с высокой твердостью и износостойкостью. Борирование повышает окалиностойкость, теплоскойкость и коррозионную стойкость. Борированные детали эффективно работают в условиях трения и износа, при достаточно высоких температурах.

Наиболее распространена технология борирования в контейнерах, заполненными порошками аморфного бора, карбида бора, ферробора, ферроборала и буры. В зависимости от выбранной системы легирования борирование может быть одно- и двухфазным. На поверхности обрабатываемых деталей образуется слой Fe_2B либо Fe_2B и FeB. Твердость поверхности зависит от химического состава обрабатываемого сплава, температурно-временных параметров насыщения и составляет порядка 16000–20000 МПа [1].

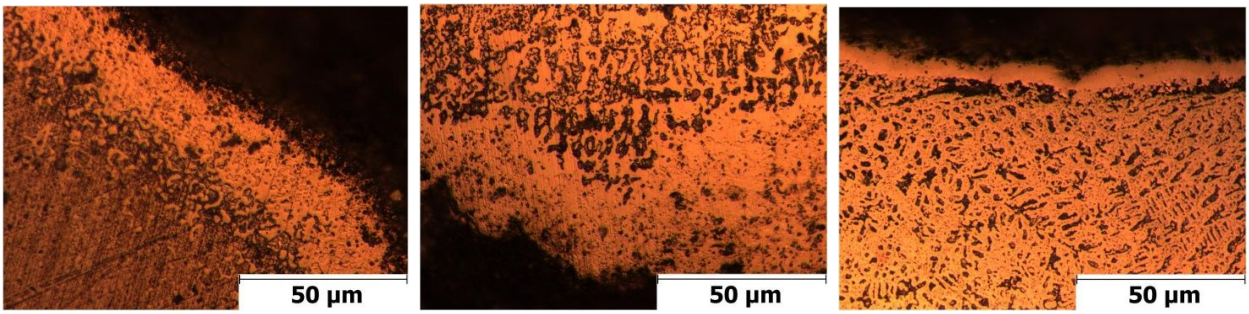
Стойкость детали после борирования увеличивается в 2–10 раз. Однофазное борирование на 20–50% увеличивает усталостную прочность конструкционных сталей, а двухфазное – уменьшает [2]. Повышение содержания в стали углерода снижает твердость FeB и практически не влияет на твердость Fe_2B. Вносят свое влияние на твердость боридного слоя и легирующие элементы, но особых закономерностей нет.

Недостатком борирования является хрупкость слоев. Наиболее хрупкая фаза FeB, поэтому при ХТО стараются преимущественно получить низкобористую фазу Fe_2B. Отдельно стоит отметить особенности диффузионного легирования микрообъектов [3]. Основным классификационным признаком является степень легированности микрообъектов. В качестве сырья эффективным является применение различных дисперсных металлических отходов производства в виде дроби, стружки и сечки, образующихся при изготовлении и обработке деталей. В большинстве случаев при борировании макродеталей стараются получать максимальные толщины диффузионных слоев (150–300 мкм). Однако получения слоя максимальной толщины не всегда является целесообразным. При диффузионном легировании (борировании) дисперсных металлических материалов часто достаточно лишь наличие диффузионного слоя небольшой толщины (до 30–50 мкм). А наличие диффузионного слоя большей толщины на дисперсных материалах лишь снизит технологические и эксплуатационные свойства используемого в дальнейшем материала.

В работе поставлена задача исследовать кинетику роста диффузионного слоя на дисперсных металлических материалах при низкотемпературном однофазном борировании в порошковых средах.

Однофазное борирование проводили в порошковых средах, разработанных сотрудниками НИЛ упрочнения стальных изделий Белорусского национального технического университета [4]. В качестве исходного материала были выбраны стальная, чугунная и высокохромистая колотая дробь фракцией 315–630 мкм. Температура обработки составляла 750 °С, время выдержки – 4 часа. Толщина полученных диффузионных слоев составляет 30–50 мкм (рис. 1), микротвердость существенно зависит от степени легированности насыщаемого материала и находится в диапазоне 8–15 ГПа. Микротвердость основы после диффузионного легирования составляет около 4–6 ГПа.

Таким образом, борирование в порошковых насыщающих средах при 750 °С позволяет формировать на обрабатываемых деталях диффузионные слои небольшой толщины. Регулируя температурно-временные параметры диффузионного легирования можно достаточно точно прогнозировать получаемые толщины диффузионных слоев на обрабатываемых материалах и при необходимости увеличения толщины слоя повышать температуру процесса, а для снижения толщины диффузионного слоя стоит сократить продолжительность процесса, либо снизить температуру насыщения.



а *б* *в*

Рисунок 1 – Однофазное борирование дроби:
а – колотая стальная, *б* – колотая чугунная, *в* – из нержавеющего сплава

Литература

1. Износостойкие боридные покрытия / В.Ф. Лабунец, Л.Г. Ворошнин, М.В. Киндрачук. – К.: Тэхника, 1989. – 158 с.

2. Ляхович Л.С., Ворошнин Л.Г., Панич Г.Г. Борировние сталей в расплавленных средах // МиТОМ. – 1969.

3. Состояние и перспективы диффузионного легирования микрообъектов /Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: Сб. науч. тр., посвящ. 40-летию каф. "Материаловедение в машиностроении" / Под ред. Ворошнина Л.Г. – Мн.: БНТУ, 2004. – С. 106–114.

4. Термодиффузионная поверхностная обработка / Борирование – режим доступа: http://www.besto.by/vidy-obrabotok/borirovanie.

Закиев В.И., Якушенко А.С. Национальный авиационный университет, Киев,
Закиев М.И. Кировоградская лётная академия Национального авиационного университета, Кропивницкий, Украина

БЕСКОНТАКТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРОФИЛОМЕТР

Экономическая целесообразность комплексного обеспечения качества деталей на всех стадиях их жизненного цикла обусловило необходимость серьезного подхода к их рабочим поверхностям [1].

Двухмерное измерение и анализ профиля до сих пор играет определяющую роль в оценке шероховатости поверхности. Однако, двухмерный расчет имеет ряд недостатков: однозначно не определено, в каком направлении производить замер и какую базовую

длину выбирать, нестабильность результатов, трудоемкость и основной недостаток – замер шероховатости производится по линии, в то время как поверхность трехмерна по своей природе. Поэтому, становится актуальным вопрос о рассмотрении не профилограммы поверхности, а ее трехмерной топографии [2–3]. Развитые страны уже имплементировали стандарт ISO 25178: Geometric Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal который определяет трехмерные параметры шероховатости поверхности.

Приборы, выпускаемые лидерами в данной области фирмами (Taylor Hobson, Ambios, VEECO, Zygo и др.) обладают хорошими метрологическими характеристиками, однако имеют весьма значительную стоимость, что ограничивает их массовое использование, как для научных исследований, так и для производственных целей. Следует отметить, что в Украине, несмотря на научные потребности, аналогичные приборы не производятся.

Рисунок 1 – Внешний вид профилометра

В связи с этим, вопрос о создании приборов позволяющих регистрировать трехмерную топографию поверхности является актуальным. На базе микроинтерферометра Линника МИИ-4 разработан бесконтактный оптический профилометр «Micron-alpha» (рис. 1). Профилометр предназначен для визуализации трехмерной топографии поверхности с последующим расчетом параметров шероховатости [4].

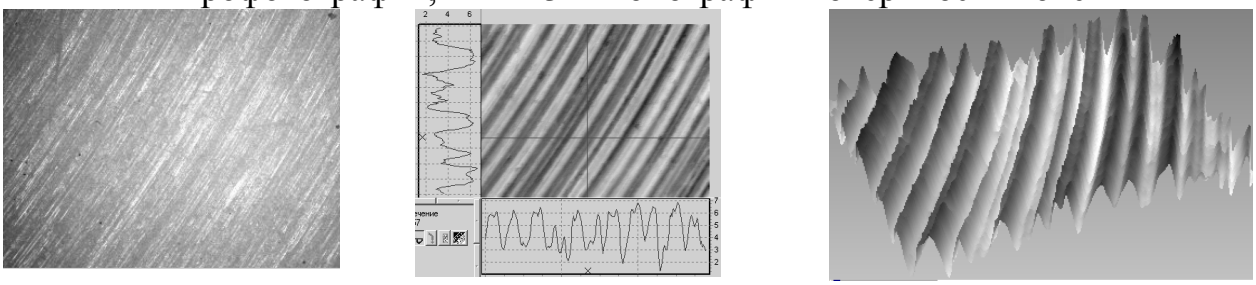
Технические характеристики:

Поле сканирования (X,Y), мкм. …… 70–2000
Максимальная измеряемая высота (Z), мкм…...80
Разрешение по вертикали (Z), нм……..1
Время регистрации, мин……..……...0,1–2,0

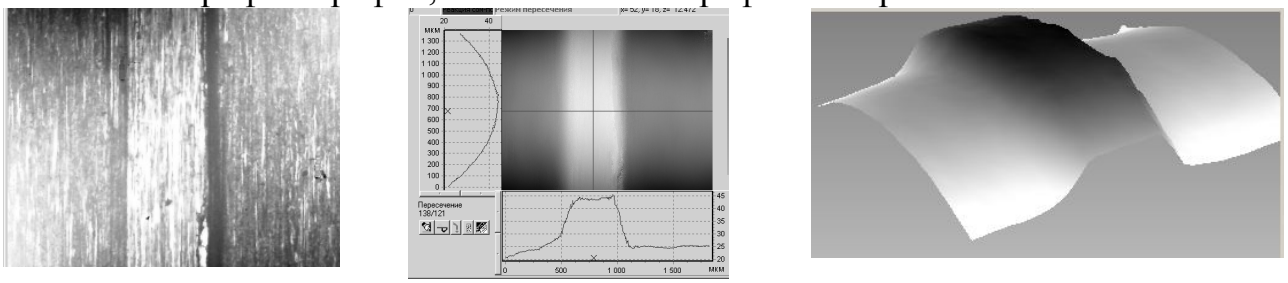
В приборе реализовано инновационное конструкторское решение автоматизированной микро-электромеханической системы управления подвижным зеркалом интерферометра, что существенно упрощает конструкцию. Разработанный профилометр может найти применение на производстве для контроля качества поверхности и критических размеров готовых изделий, а также в научных лабораториях занимающимися исследованиями процессов разрушения, деформации, трения и износа, влияния различных видов обработки на качество по-

верхности, измерять толщину нанопленок и покрытий и т.д. На рис. 2 представлены примеры различных поверхностей, зарегистрированных на оптическом профилометре «Micron-alpha».

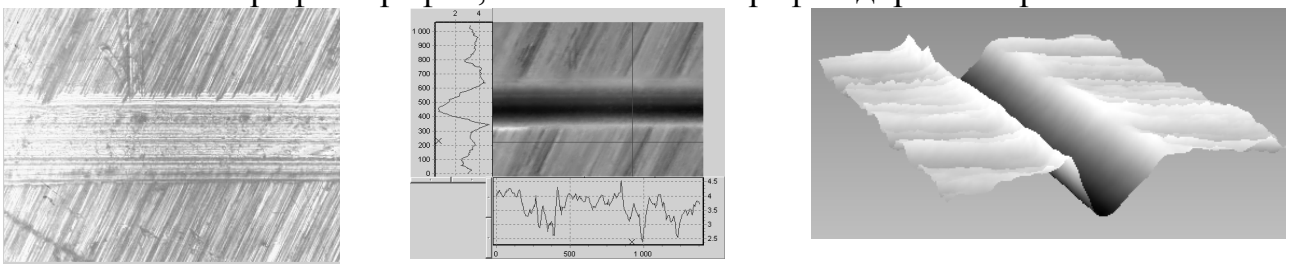
Микрофотография, 2-D и 3-D топография поверхности точения



Микрофотография, 2-D и 3-D топография поверхности точения



Микрофотография, 2-D и 3-D топография дорожки трени



Микрофотография, 2-D и 3-D топография лунок абразивного износа покрытия

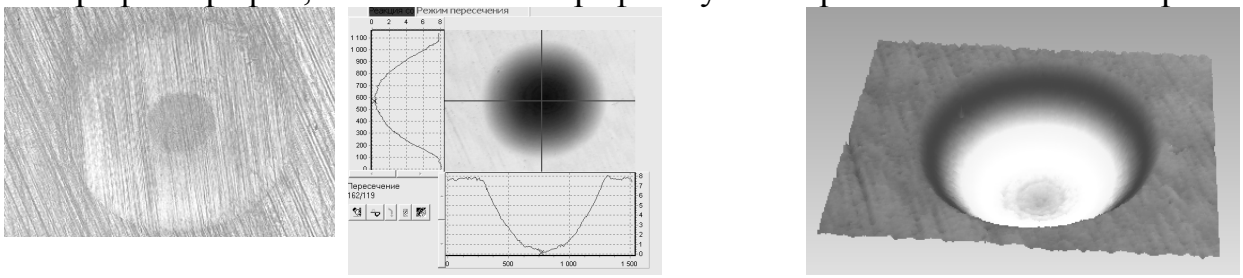


Рисунок 2 – примеры поверхностей, зарегистрированных на оптическом профилометре «Micron-alpha»

Литература

1. А.Г. Суслов и др. Инженерия поверхности деталей. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

2. W.P. Dong, K.J. Stout. An integrated approach to the characterization of surface wear I: Qualitative characterization // Wear.– 1995. – V. 181/183. – P. 700–716.

3. D. Whitehouse. Surfaces and their measurements. – London: Kogan page science, 2002. – 395 p.

4. С.Р. Игнатович, И.М.Закиев, В.И.Закиев. Методика бесконтакнтой регистрации поверхностного рельефа объектов в трехмерном нанометрическом диапазоне. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4. – С. 46–49.

Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И.
Национальный авиационный университет, Киев, Украина

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Разработанный прибор, “Micron-gamma” (рис. 1), позволяет исследовать материалы и покрытия методами:

- непрерывного вдавливания;
- статического сканирования;
- прогрессивного сканирования;
- малоциклового сканирования;
- скалывания кромки образца;

Отличительной особенностью прибора является применение дифференциального датчика малых перемещений, измеряющего глубину внедрения индентора относительно поверхности исследуемого образца, а не станины прибора, что позволяет значительно облегчить конструкцию.

Основные технические характеристики:

Диапазон нагрузок, гс……..…0,01–500
Измеряемая глубина, мкм……0,01–200
Диапазон сканирования, мм……...30×30
Скорость сканирования, мкм/с…20 и 60
Разрешение видео камеры, Мр……2,0
Увеличение микроскопа……..×10–500

Метод непрерывного вдавливания индентора основан на автоматической регистрации нагрузки на индентор и глубины его внедрения. Результаты представляются в виде диаграммы нагружения (рис. 2), обработка которой позволяет испытывать на микротвердость, изучать особенности микродеформации, измерять упругость материалов.

Рисунок 1 – Внешний вид “Micron-gamma”

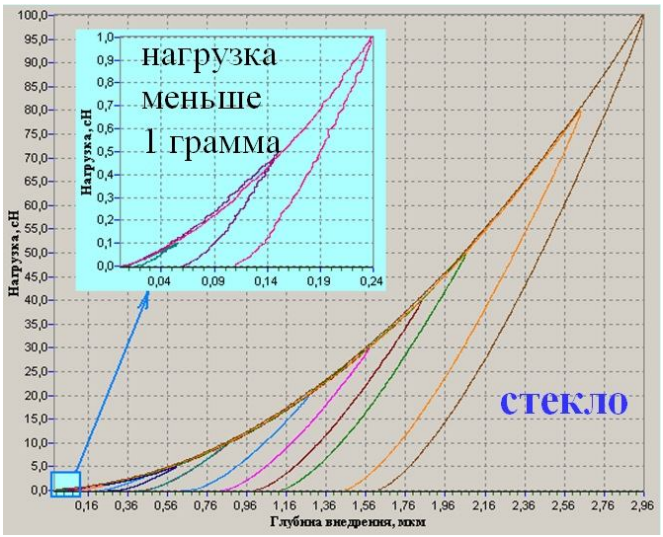


Рисунок 2 – Диаграмма нагружения

Метод статического сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности с заданной постоянной нагрузкой (рис. 3). Определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъемов материала контактному деформированию методами теории случайных процессов позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования и, в частности, дает возможность:

- оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств;
- моделировать элементарные акты процессов трения и износа (микрорезания, микроскольжения).

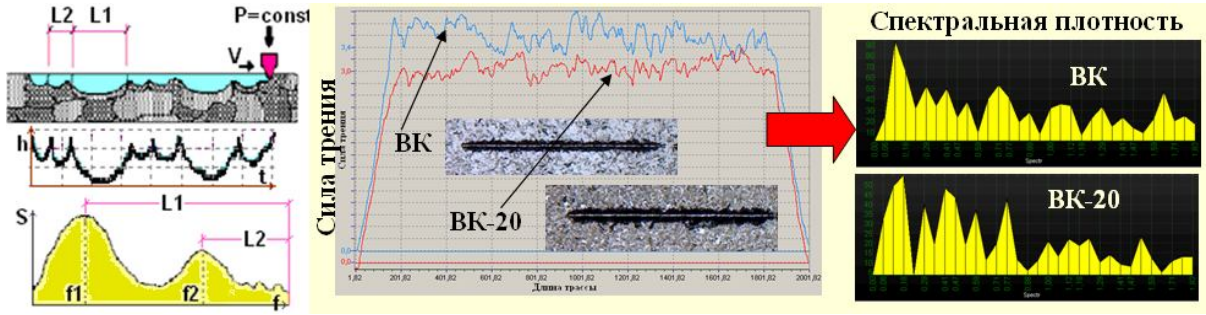


Рисунок 3 – Модель и примеры применения спектральной плотности

Метод прогрессивного сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности при плавно нарастающей и убывающей нагрузке на индентор. Регистрация моментов хрупкого разрушения и скалывания поверхности (покрытия), сопровождающиеся скачками тангенциальной

силы и позволяют регистрировать момент хрупкого разрушения поверхности и адгезионную прочность покрытий (рис. 4).

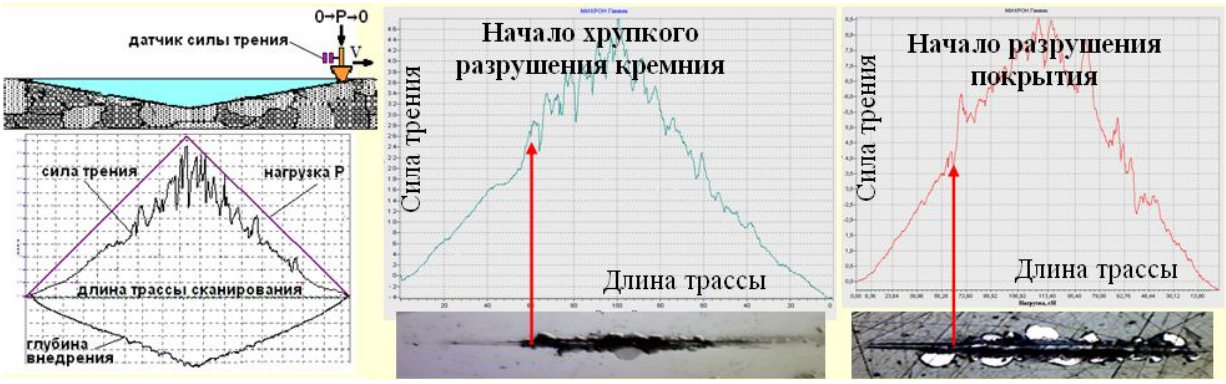


Рисунок 4 – Модель и примеры применения на кремнии и покрытии

Метод повторного (малоциклового) сканирования основан на многократных повторных проходах для изучения стойкости поверхности к усталостному разрушению и изнашиванию (рис. 5).

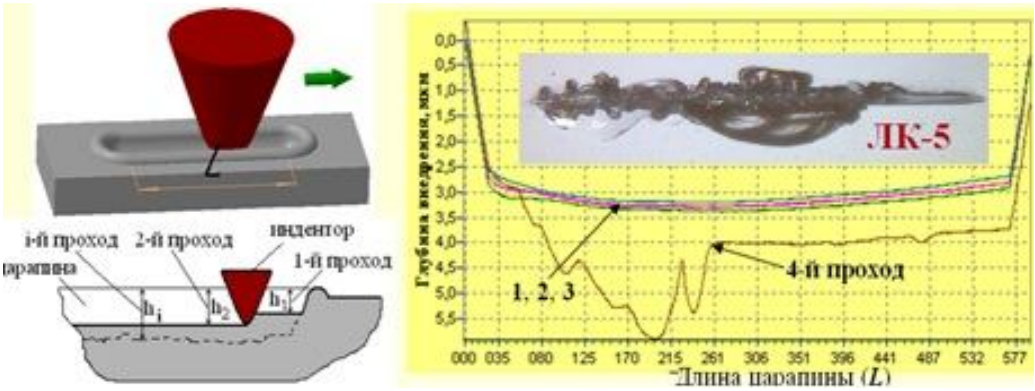


Рисунок 5 – Модель повторного сканирования и пример на стекле

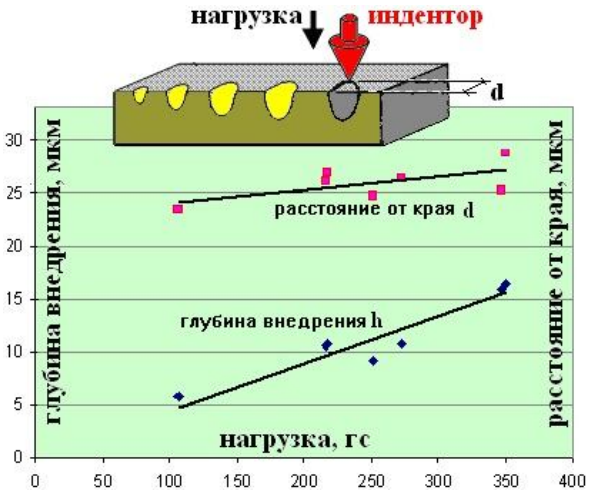


Рисунок 6 – Модель и графики зависимости глубины и расстояния от нагрузки керамики

Метод определения трещиностойкости при микроскалывании кромок образцов основан на регистрации силы, при которой скалывается кромка образца на заданном расстоянии (рис. 6).

Жук Г.В., Лебедев В.А. Институт электросварки
им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ И МЕХАНИЗИРОВАННАЯ СВАРКА И НАПЛАВКА С УПРАВЛЯЕМОЙ ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

Для расширения технико – технологических возможностей дуговой механизированной и автоматической сварки и наплавки сплошными и порошковыми электродными проволоками. В ГП ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработано несколько новых, до настоящего времени неизвестных в технике сварочного оборудования и технологии вариантов систем управления переносом электродного металла с использованием импульсных алгоритмов воздействия на систему подачи электродной проволоки. Основные из них основаны на дозированной подаче проволоки по заранее установленным характеристикам и использовании обратных связей по параметрам дугового процесса.

Реализация этих процессов осуществляется с помощью безредукторных механизмов подачи современного типа с применением быстродействующих компьютеризованных вентильных электроприводов разработанных в Украине и позволяющих отрабатывать частоты импульсной подачи электродной проволоки в диапазоне 10–60 Гц с заранее установленными характеристиками. Ранее на основе этих технических средств разработаны механизмы с управляемой импульсной подачей [1], которые позволили осуществить сварку и наплавку с улучшенными технико-технологическими характеристиками за счёт стабилизации переноса капель электродного металла [2].

Отличие новых способов сварки с управляемой дозированной подачей от сварки с управляемой импульсной подачей принципиально и заключается в том, что дозирование подачи электродной проволоки осуществляется в соответствие с течением сварочного процесса, информация о котором вводится в регулируемый вентильный электропривод в виде сигналов тока или напряжения дуги.. Можно уточнить, что функционирование электропривода, кроме действия обратных связей, обуславливается устанавливаемыми моментами включения и остановки движения проволоки с определённой скоростью. С использованием новых разработок получены результаты, расширяющие возможности сварки и наплавки как

сплошными та и порошковыми проволоками, как в защитных газа, так и без них при применении самозащитных электродных проволок. Последнее особенно важно, так как может быть использовано при сварке, восстанавливающей и упрочняющей наплавке узлов и деталей машин и механизмов непосредственно на месте эксплуатации. Процесс с управляемой дозированной подачей порошковой электродной проволокой по характеру переноса электродного металла может быть различным – с короткими замыканиями дугового промежутка и без них. Для примера можно отметить, что впервые получен процесс сварки – наплавки порошковой электродной проволокой с короткими замыканиями дугового промежутка, что показано на осциллограммах рис. 1.

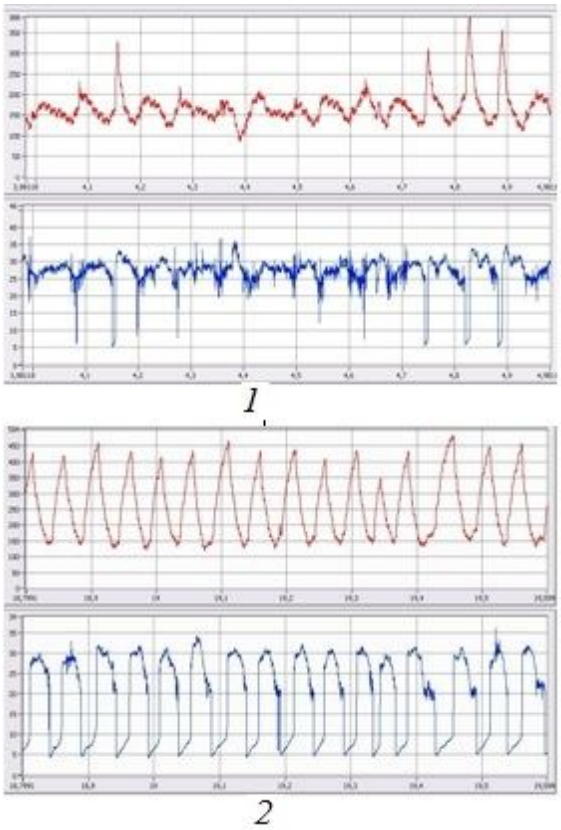


Рисунок 1 – Осциллограммы тока и напряжения: 1 – обычный процесс; 2 –новый процесс с дозированной подачей электродной проволоки (ток 200 А и напряжение 27 В вверху и внизу соответственно)

Управляемость процессом переноса электродного металла позволяет осуществить сварку наплавку в различных пространственных положениях с качественным формированием сварного шва и наплавленных валиков, которые ранее получить не удавалось. Это относится к процессам с использованием, как сплошных, так и порошковых электродных проволок. Получены хорошие результаты при выполнении сварных швов и наплавленных валиков на вертикальной плоскости и в потолочном положении.

Следует уточнить, что при выполнении сварки-наплавки на вертикальной плоскости требует преодоления двух основных задач:

- исключение стекания наплавленного металла и обеспечение удовлетворительного формирования сварного шва или наплавленного валика;
- снижение энерго и ресурсозатрат, связанных, в частности, с потерями электродного металла в виде крупных капель.

Одним из наиболее сложных положений для выполнения сварки и наплавки на вертикальной плоскости является горизонтальное на токах значительных величин (200 и более А). При использовании нового способа сварка выполнение сварки – наплавки в указанном положении можно получить результат, показанный на рис.2. При этом использовалась порошковая самозащитная электродная проволока.

Рисунок 2 – Валики, наплавленные самозащитной электродной проволокой диаметром 1,6 мм с применением системы управления с введением обратных связей по току дуги на различных токах и напряжениях:
1 – ток 230 А напряжение 28 В; 2 – ток 180 А, напряжение 26 В

Выполненная новая разработка может быть предложена для выполнения сварочно-наплавочных работ механизированным и автоматическим способами в следующих областях:

- сварочно-наплавочные работы с применением, в том числе, порошковых электродных проволок в монтажных или рабочих условиях
- подводная сварка-наплавка, в частности проблемных швов на вертикальной плоскости и в потолочном положении;
- сварка поясных и вертикальных швов при сборке крупногабаритных резервуаров;
- выполнение сварочных работ при формировании бортовых вертикальных секций ж/д вагонов;

Литература

1. В.А. Лебедев, В.В. Рымша, И.Н. Радимов Современные вентильные электроприводы в системах механизированного сварочного оборудования // Електромашинобудування та Електрообладнання. – К.: Техніка, 2009. – Вип. 74. – С. 22–24.

2. Lebedev V., Reisgen U., Lendel I. Study of technological opportunities of GMAwelding andsurfacing with pulse electrode wirefeed // Welding in the World. – 2016. – P. 9

Лебедев В.А., Новиков С.В. Институт электросварки
им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НАПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ И ИНСТРУМЕНТА

Для изучения влияния механических колебаний ванны, их характеристик на свойства наплавленных валиков в ИЭС им. Патона НАНУ была разработана установка, позволяющая осуществлять механические колебания ванны, как показано на рис. 1.

Суть работы установки представлена на рис. 1 [1]. Манипулятор состоит из рамной станины 1, на которую, с помощью полуосей 2, 3 в опоры с шариковыми подшипниками 4, 5, устанавливается поворотный стол 6. К шпинделю 7 стола, крепится планшайба 8. Вращение и колебания планшайбы в плоскости, осуществляется вентильным электродвигателем 9, вал которого через муфту 10 соединен со шпинделем 7. Полуось 3 стола, через муфту 11, соединена с валом вентильного электродвигателя 12, который осуществляет наклон стола манипулятора на угол от 0º до 135º, а также , при необходимости, осуществляет его колебания. Блок управления 13, обеспечивающий цикл и режимы работы электродвигателей манипулятора, состоит из блока управления 14 электродвигателем 12 блока управления 15 электродвигателем 9 и общей системы регулирования 16 с регуляторами параметров совместной работы электродвигателей, с помощью которой выполняется выбор режимов и осуществляется программирование цикла работы двигателей.

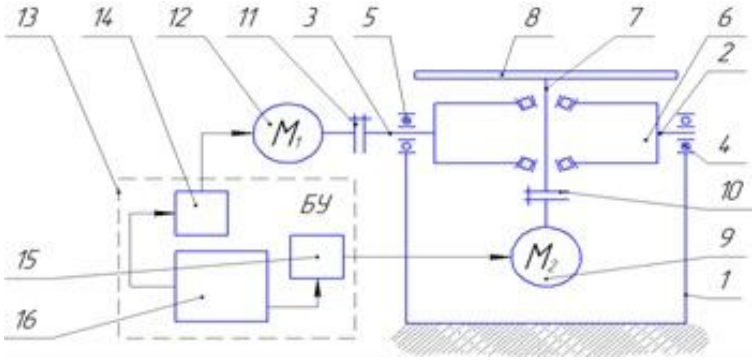


Рисунок 1 – Кинематическая схема универсального манипулятора с возможностью низкочастотной вибрационной обработки ванны

Как известно, наибольшая эффективность управления формированием дисперсности структуры определяется амплитудно – частотными характеристиками температурных колебаний вблизи фронта кристаллизации [2-4], которые определяются скоростью

сварки. Исходя из чего, были аналитически определены скорость наплавки при различных типах аддитивных колебаний, где основным критерием было условия сплошности [5].

В случае колебания ванны, заданным электродвигателем M_1 (рис. 2), и совместного колебания сварочного инструмента по гармоническому закону $y = \frac{L}{2}\sin\omega t$, где ω – угловая частота колебания, L – размах колебания, скорость наплавки определится одним из выражений:

$$V_н = \left(\frac{\sqrt{2s_2} \pm \sqrt{2s_2 - 4\left(\frac{p}{2} + s_2 + \frac{q}{2\sqrt{2s_2}}\right)}}{2} + \frac{A}{4} \right)^2 \text{ или}$$

$$V_н = \left(\frac{-\sqrt{2s_3} \pm \sqrt{2s_3 - 4\left(\frac{p}{2} + s_3 - \frac{q}{2\sqrt{2s_3}}\right)}}{2} + \frac{A}{4} \right)^2$$

где s_2 и s_3 – комплексные выражения, являющиеся корнями уравнения сплошности, p, q, r, A – действительные выражения, определяющие коэффициенты этого уравнения.

Рисунок 2 – Схема колебания сварочной ванны, заданного электродвигателем M_1

В случае продольного (вдоль оси наплавки) колебания ванны, заданным электродвигателем M_2, и совместного колебания сварочного инструмента, скорость наплавки будет иметь вид:

$$V_{н} = \frac{1}{2}\left(\frac{L\omega}{2} \frac{(1-\sin\omega t)|\cos\omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1-\sin\omega t)^2}} + \psi(0)\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin\frac{\pi n}{K} ct \sin\frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial\psi(t)}{\partial t} \pm \right.$$
$$\left. \pm \sqrt{\left(\frac{L\omega}{2} \frac{(1-\sin\omega t)|\cos\omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1-\sin\omega t)^2}} + \psi(0)\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin\frac{\pi n}{K} ct \sin\frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial\psi(t)}{\partial t} \right)^2 + \right.$$
$$\left. + 4\sum_{n+1}^{\infty} \left(\left(\frac{\partial\psi(t)}{\partial t} \right)\Big|_{t=0} \right) \cos\frac{\pi n}{K} ct \sin\frac{\pi n}{K} x \right)$$

где l – ширина шва, K – длина шва, $\psi(t)$ – заданный закон колебания планшайбы 8 (сварочной ванны), $\psi(0)$ – положение сварочной ванны в начальный момент времени, n – любое целое число, $c = \sqrt{\frac{F}{\rho}}$, ($F$ – сила обусловленная вязкостью расплава, ρ – плотность расплава) – коэффициент учитывающий силу инерции и силу поверхностного натяжения расплава, x – горизонтальная координата положения сварочной ванны.

Литература

1. Лебедєв В.О., Максимов С.Ю., Лендєл І.В. Універсальний маніпулятор з можливістю низькочастотної вібраційної обробки зварювальної ванни // Патент на корисну модель №80823. – Бюл. – 2013. – № 11.

2. Болдырев А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну // Сварочное производство. – 1976. – № 2. – С. 52–55.

3. Славин Г. А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну // Сварочное производство. – 1980. – № 6. – С. 3–5.

4. Аристов С. В., Руссо В. Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // Сварочное производство. – 1982. – № 11. – С. 42–44.

5. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону / А.И. Данилов и др. // Сварочное производство. – 1980. – № 2. – С. 26.

СОДЕРЖАНИЕ

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ 3

Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.
ПРОИЗВОДСТВО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ НАНОАЛМАЗОВ ПОЛУЧАЕМЫХ ДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ 5

Адамовский А.А., Варченко В.Т., Найдич Ю.В.
ТРЕНИЕ И ИЗНОС СВЕРХТВЕРДЫХ И ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ 8

Акулович Л.М., Миранович А.В., Мисько В.Г.
СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ 10

Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Сенчуров Е.В., Дубновицкий С.К.
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЗАКАТОЧНЫХ РОЛИКОВ 13

Блюменштейн В.Ю.
ПРОФИЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРУЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ 16

Бородавко В.И., Вабищевич П.А., Грецкий Н.Л., Пынькин А.М., Пуляев В.К., Волотовский Ф.А., Корзун А.Е., Хейфец М.Л.
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПАКЕТА ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН 18

Бородавко В.И., Грецкий Н.Л., Пынькин А.М., Хейфец М.Л., Волотовский Ф.А., Корзун А.Е.
УСТАНОВКА ДЛЯ ПОСЛОЙНОГО НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ И УПРОЧНЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ 22

Бурыкин В.В., Рыжов Ю.Э.
ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ РЕЗЦАМИ ИЗ ПСТМ 25

Варюхно В.В., Довгаль А.Г., Данилейко О.В., Сидоренко О.Ю.
ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ТА ПОЛІПШЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ 27

Гуцаленко Ю.Г.
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ РАСШИРЕННОЙ АДАПТАЦИИ К АЛМАЗНО-ИСКРОВОМУ ШЛИФОВАНИЮ 29

Девин Л.Н., Рычев С.В., Кирдан О.Ю.
ИЗУЧЕНИЕ СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАСТИКА МЕТОДОМ ТОНКОГО АЛМАЗНОГО ТОЧЕНИЯ 31

Дерев'янченко О.Г., Кожухар Т.В.
ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ КЛАСІВ КОМПОНЕНТІВ СТРУКТУР МАТЕРІАЛІВ 34

Домуладжанов И.Х., Домуладжанова Ш.И.
СТОЧНЫЕ ВОДЫ 35

Евтифеев С.Л.
УПРАВЛЕНИЕ ТРИБОЛОГЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 40

Ерёмина М.А., Ломаева С.Ф., Паранин С.Н., Тарасов В.В., Трифонов И.С.
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕХАНОСИНТЕЗИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ TiC-Cu 42

Ермишкин В.А., Овчинников И.Н., Минина Н.А., Ляховицкий М.М., Нестеренко Е.А., Покрасин М.А.
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 46

Калашников И.Е., Болотова Л.К., Кобелева Л.И., Колмаков А.Г., Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Хейфец М.Л.
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ НАПЛАВОЧНЫХ ПРУТКОВ НА ОСНОВЕ БАББИТА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ 50

Калентьев Е.А., Тарасов В.В.
УПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО С ПОЛОСТЯМИ В ФОРМЕ ПИРАМИДЫ И ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА 52

Кислица М.В., Геворкян Э.С., Прокопив Н.М., Чишкала В.А.
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Al_2O_3–SiC В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДАЦИИ 55

Клименко С.А.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТОКАРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ cBN 56

Клименко С.Ан., Мановицкий А.С., Копейкина М.Ю., Клименко С.А.
ТОПОГРАФИЯ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗЦА С РАДИУСОМ ПРИ ВЕРШИНЕ ИЗ ПКНБ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 59

Кодирова Д.Т., Тухтаев С.
РАСТОРИМОСТЬ В СИСТЕМЕ ХЛОРАТ МАГНИЯ–РОДАНИД АММОНИЯ–ВОДА 62

Константинов В.М., Дашкевич В.Г., Судников М.А.
ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО БОРИДНОГО СЛОЯ НА СТАЛИ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ МЕДНЕНИИ ОСНОВЫ 65

Копылов В.И.
ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА РАССЕЯНИЕ ЭНЕРГИИ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В ПЛАЗМЕННЫХ МНОГОФАЗНЫХ ПОКРЫТИЯХ 68

Корзун А.Е., Волотовский Ф.А., Пынькин А.М., Насыбулин А.Х., Гайко В.А., Позылова Н.М., Хейфец М.Л.
ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 72

Кравчук Л.В., Буйских К.П., Задворный Е.А., Киселевская С.Г., Феофентов Н.Н.
ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛА И ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ 75

Кривощеков В.Е.
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА: ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ОЦЕНКА ПРОБЛЕМЫ 78

Крючков Ю.Н.
ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ 79

Кузнецов С.Ю., Лёвушкина Н.В., Фатюхин Д.С.
ПОВЫШЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКЛЁПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА 82

Лавров А.С.
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС КАК ВАЖНЕЙШИЙ ФАКТОР ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРЕДПРИЯТИЯ 84

Лавров С.Н., Лавров А.С., Чепиль В.В.
ПОРОШКОВЫЕ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ РЕМОНТА ВАЛКОВ ЦЕНТРИФУГ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ 87

Латипова М.И., Домуладжанова Ш.И., Домуладжанов И.Х.
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ – КАК НАУКА 89

Лебедев В.Г., Клименко Н.Н.
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ШЛИФОВАНИЯ 94

Лебедев В.Г., Луговская Е.А., Овчаренко А.В.
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СИЛ РЕЗАНЬЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НАПЛАВЛЕНОГО СЛОЯ ИЗ МАРТЕНСИТНО–СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИСПОЛЬЗУЯ ШЛИФОВАЧНЫЕ КРУГИ ИЗ: ЭЛЬБОРА, АЛМАЗА И АБРАЗИВА 97

Лебедев В.Г., Луговская Е.А., Овчаренко А.В.
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НАПЛАВЛЕНОГО СЛОЯ ИЗ МАРТЕНСИТНО–СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИСПОЛЬЗУЯ ШЛИФОВАЧНЫЕ КРУГИ ИЗ: КБН, АЛМАЗА И АБРАЗИВА 99

Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В.
КИНЕТИКА ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 102

Лебедев В.Г., Чумаченко Т.В., Фроленкова О.В.
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГЛУБИНЕ НАПЫЛЕННОГО ТЕРМОБАРЬЕРНОГО СЛОЯ ZRO_2 ПРИ ШЛИФОВАНИИ АБРАЗИВНЫМИ ЭЛЬБОРОВЫМИ И АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ 105

Лопата Л.А., Волков Ю.В., Соловых А.Е., Катеринич С.Е.
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАЛОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ 108

Ляшенко Б.А., Кузін М.О., Чиграй С.Л., Михайлюта С.С.
УПРАВЛІННЯ ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ ПОРИСТИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ 111

Максимова С.В., Воронов В.В., Ковальчук П.В.
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИПОЕВ БЕЗ БОРА 115

Маленко П.И., Релмасира К.Д., Леонов А.Ю.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ НИКОТРИРОВАННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ СМАЗЫВАНИЕМ 117

Манохін А.С., Клименко С.А., Копєйкіна М.Ю., Чумак А.О.
КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ В ЗОНІ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТАМИ З ПНТМ НА ОСНОВІ cBN 120

Мирзаева Г.С., Абдуллаева М.А.
РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РЕМОНТЕ И ОБСЛУЖИВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ПЕРЕВАЛЕ «КАМЧИК» 122

Насакина Е.О., Баикин А.С., Серегин А.В., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А., Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Хейфец М.Л.
КИНЕТИКА РАСТВОРЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРНОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА В ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЬНЫХ СРЕДАХ 127

Неверов А.Н., Сергеев И.Д.
ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В АКУСТИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ 130

Нигметзянов Р.И., Сидоренко А., Сундуков С.К.
ДИНАМИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО НАКЛЕПА СВОБОДНЫМ ДЕФОРМИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ 133

Николайчук В.Я., Лопата В.Н., Черновол М.И., Соловых Е.К., Дудан А.В.
СОЗДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr-C-Si-Ni 135

Овчинников В.С., Сивцев Н.С., Лукин Е.В., Шубина М.И.
ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ РОТОРА ВИНТОВОГО ЗАБОЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ 139

Поболь И.Л.
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ МЕТОДОВ 142

Поболь И.Л., Нмаду Д.
ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ СПЛАВОВ АД1 И АМГ2 145

Погудин С.А.
К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ 147

Польский Е.А., Никонов О.А., Митраков Н.С.
ПРОЕКТИРОВАНИИ МАРШРУТНО-ОПЕРАЦИОННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕТОДОМ СИНТЕЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ CALS ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ 150

Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Аксьом П.А.
ПРО ФІЗИЧНУ ПРИРОДУ ПОЛІПШЕННЯ ОБРОБЛЮВАНОСТІ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ 153

Прокофьев А.Н., Польский Е.А., Звягинцев Ф.Д.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СВАРНЫХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ CALS ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ 157

Пустохин Д.С., Круглов В.В., Пачурин Г.В.
АЭРОЗОЛЬНОЕ ЭПИЛАМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ 161

Рощупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Минина Н.А., Покрасина Е.М., Кудрявцев Е.М., Нестеренко Е.А, Кольцов А.Г.
АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 30ХГСА В ЗАКАЛЕННОМ И ОТОЖЖЕННОМ СОСТОЯНИЯХ 163

Рощупкин В.В., Терентьев В.Ф., Пенкин А.Г., Покрасин М.А., Кольцов А.Г.
АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ТОНКОЛИСТОВОЙ ТРИП-СТАЛИ НА СТАДИИ МИКРОТЕКУЧЕСТИ 167

Рябченко С.В., Середа Г.В.
ШЛИФОВАНИЕ НАПЛАВОК АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ ИЗ РУБИН-КОРУНДА 171

Сенють В.Т.
РАЗРАБОТКА СВЕРХТВЕРДЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ НИТРИДА БОРА 173

Ситкевич М.В., Булойчик И.А.
АНАЛИЗ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЦИНКОВЫХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ СЛОЕВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ 175

Сорокин С.В.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ 178

Сохань С.В., Сороченко В.Г.
ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ШЛІФУВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ КУЛЬ ІЗ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ 180

Сохань С.В., Сороченко В.Г.
ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ВИСОКОПРОДУКТИВНОЇ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ПРЕЦИЗІЙНИХ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ КАРБІДНОЇ КЕРАМІКИ 186

Стахнив Н.Е, Девин Л.Н., Нечипоренко В.Н.
ВЛИЯНИЕ НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ НА СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ 187

Струтинський В.Б., Варченко Т.І., Плахотнюк В.В.
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ НА ДОВОДОЧНІЙ ОПЕРАЦІЇ 190

Струтинський В.Б., Юрчишин О.Я., Полунічев В.А.
ПОХИБКИ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ КОНТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ВЕРСТАТАХ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ КІНЕМАТИЧНИМИ СТРУКТУРАМИ 192

Тимофеева Л.А.
ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ ОКСИЛЕГИРОВАНИЯ 194

Тимофеева Л.А., Воскобойников Д.Г.
ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ 196

Тимофеева Л.А., Тимофеев С.С., Огульчанская Н.Р.
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 198

Тимофеева Л.А., Титар Д.Н.
ВЫБОР МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ 200

Титаренко В.И., Лантух В.Н., Лендел Ю.Ю., Пилипко В.И, Мудранинец И.Ф.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПЛАВОЧНЫХ УСТАНОВОК – СОВМЕСТНЫЙ ИТОГ РАБОТЫ ООО «НПП РЕММАШ» И ПАО «ИЗМСО» 201

Турсунов А.С., Абдуллаева М.А., Тешабаев А.М.
ТРАНСПОРТ, ЭКОЛОГИЯ И ЗДОРОВЬЕ 210

Федоров В.П., Анкуда С.Н., Хейфец И.М.
МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ПРОЦЕССАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 215

Федченко И.И., Мельник Д.Ю.
АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 218

Филькин Д.М.
ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИЗМЫ НА ТОЧНОСТЬ УСТАНОВКИ 220

Фуніков О.В., Сергійчук І.Ю., Балицька Н.О., Ночвай В.М., Яновський В.А., Полонський Л.Г., Харламов Ю.О.
ВИБІР ГАЗОТЕРМІЧНОГО ПОКРИТТЯ ТА СПОСОБУ ЙОГО НАНЕСЕННЯ 224

Хамдамова Ш.Ш., Мирсалимова С.Р., Тухтаев С.
РАСТВОРИМОСТЬ СИСТЕМЫ ХЛОРАТ КАЛЬЦИЯ–НИТРАТ КАЛЬЦИЯ–ВОДА ПРИ 20 °С 227

Харламов Ю.А.
МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ В ГИБРИДНЫХ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМАХ 230

Харламов Ю.А.
ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ 236

Чемодуров А.Н.
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ 238

Щербаков В.Г., Астрашаб Е.В.
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ДИФФУЗИОННОЕ БОРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ 241

Закиев В.И., Якушенко А.С., Закиев М.И.
БЕСКОНТАКТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРОФИЛОМЕТР 243

Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И.
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ИНДЕНТИРОВАНИЯ 246

Жук Г.В., Лебедев В.А.
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ И МЕХАНИЗИРОВАННАЯ СВАРКА И НАПЛАВКА С УПРАВЛЯЕМОЙ ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ 249

Лебедев В.А., Новиков С.В.
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НАПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ И ИНСТРУМЕНТА 252

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНОВАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ

Материалы 17-й Международной научно-технической конференции, 29 мая–02 июня 2017, г. Одесса

Компьютерная верстка: Копейкина М.Ю.

Подписано в печать 12. 05. 2017
Формат 60×84×1/16. Бумага типографская
Печать офсетная. Уч. изд. л. 22,0.
Тираж 150 экз.

Ассоциация технологов-машиностроителей Украины
04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2