

УСКОРЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЗА СЧЕТ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРОГО  
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Астапенков Р.Г., Голубов Н.В. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Важным этапом технической подготовки производства в машиностроении является изготовления прототипа изделия. Одним из способов, позволяющим существенно сократить сроки выполнения этого этапа, - это технология быстрого прототипирования, позволяющая объединить преимущества твердотельного моделирования с процессами создания функциональных моделей и оснастки.

Идеология ускоренного формообразования изделия (модели, прототипа) RP (Rapid Prototyping) базируется на компьютерном автоматизированном 3D-CAD - проектировании изделия, визуализации и оптимизации его конструкции исходя из требований дизайна и функциональных свойств. Затем происходит трансформация твердотельной модели в совокупность двухмерных послойных моделей и воспроизведение этой совокупности, т. е. материализация как единого целого, как физического твердотельного изделия или его прототипа (рис.1) [1].

Основным различием между технологиями прототипирования является формообразующий материал, а также способ его нанесения. Характеристики основных технологий, их достоинства и недостатки рассмотрим ниже.



Рис. 1. Структура процесса ускоренного формообразования

Стереолитография (SLA - Stereo Lithography Apparatus) является самым первым и наиболее распространенным методом прототипирования, во многом благодаря достаточно низкой стоимости прототипа. Принцип метода состоит в послойном отверждении жидкого фотополимера лазерным лучом, направляемым сканирующей системой (рис.2). Элеватор находится в емкости с жидкой фотополимерной композицией, и после отверждения очередного слоя смещается вниз с шагом 0,025-0,3 мм. Используется достаточно твердый, но хрупкий полупрозрачный материал, подверженный короблению под влиянием атмосферной влаги. Материал легко обрабатывается, склеивается и окрашивается. Качество поверхностей без доводки хорошее[2].

Технология SLS (Selective Laser Sintering - лазерное спекание порошковых материалов) В SLS технологии в качестве рабочего материала используются порошковый пластик, металл или керамика, близкие по свойствам к конструкционным маркам. На поверхность наносится тонкий слой порошка, который затем спекается лазерным лучом, формируя твердую массу, соответствующую сечению 3D-модели и определяю-

щую геометрию детали (рис.3). SLS это единственная технология, которая может быть применена для изготовления металлических деталей и формообразующих для пластмассового и металлического литья. Прототипы из пластмасс обладают хорошими механическими свойствами, могут быть использованы для создания полнофункциональных изделий [2].

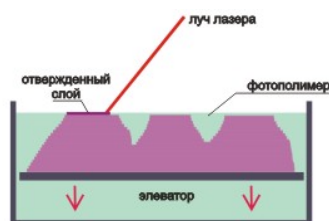


Рис. 2. Схема реализации технологии стереолитографии

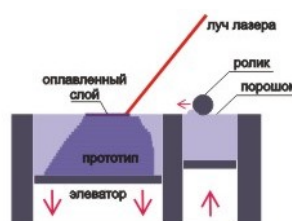


Рис. 3. Схема реализации технологии лазерного спекания порошковых материалов

Технология FDM (Fused Deposition Modeling - послойное наложение расплавленной полимерной нити). Используются нити из АБС, поликарбоната или воска. Свойства используемых пластиков очень близки к конструкционным маркам. Термопластичный моделирующий материал подается через выдавливающую головку с контролируемой температурой, нагреваясь там до полужидкого состояния. Головка наносит материал очень тонкими слоями на неподвижное основание с высочайшей точностью. Последующие слои ложатся на предыдущие, отвердевают и соединяются друг с другом (рис.4). Технология применяется для получения единичных образцов изделий, по своим функциональным возможностям приближенных к серийным, а также для производства выплавляемых моделей для литья металлов [2].

Технология струйного моделирования (Ink Jet Modelling). Все технологии имеют свои особенности, но функционируют по одному принципу. Головка, содержащая от двух до 96 сопел наносит модельный и поддерживающий материал на плоскость слоя. После нанесения слоя, могут проводиться его фотополимеризация и механическое выравнивание. В качестве поддерживающего материала обычно используется воск, а в качестве модельного - широкий спектр материалов, очень близких по свойствам к конструкционным термопластам (рис. 5). Данный метод позволяет получать прозрачные и окрашенные прототипы с различными механическими свойствами - от мягких, резиноподобных до твердых, похожих на пластики [2].

Технология склеивания порошков (binding powder by adhesives). Используются крахмально-целлюлозный порошок и жидкий клей на водяной основе, который поступает из струйной головки и связывает частицы порошка, формируя контур модели. По окончании построения излишки порошка удаляются. Для увеличения прочности модели, имеющиеся пустоты могут быть заполнены жидким воском. Такие технологии позволяют не просто создавать 3D-объекты произвольной формы, но еще и раскрашивать их [2].

Технология построения модели путем послойного склеивания ПВХ-пленки (PSL - Plastic Sheet Lamination). Послойное склеивание пленочных материалов, например, полимерной пленки или ламинированной бумаги с последующим формированием («вырезанием») модели с помощью лазерного луча или режущего инструмента. Модельным материалом служит полихлорвиниловая пленка толщиной 0,15 мм. Формирование модели производится путем последовательного склеивания слоев пленки и вырезания

контура модели с помощью лезвия, закрепленного на подвижной головке. Модель строится на специальной магнитной подложке, устанавливаемой на подвижной (вверх-вниз) платформе. Клеевой состав наносится на всю поверхность слоя пленки, а в те места, где после построения необходимо обеспечить легкое удаление пленки, наносится «антиклей». Т. е. тело модели формируется за счет последовательного склеивания пленки, а «пустоты» остаются не склеенными, чтобы обеспечить легкое удаление «лишней» пленки из этих «пустот» в процессе пост-обработки [3].

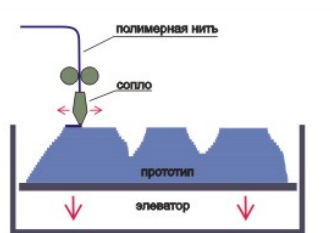


Рис. 4. Схема реализации технологии послойного наложения расплавленной полимерной нити

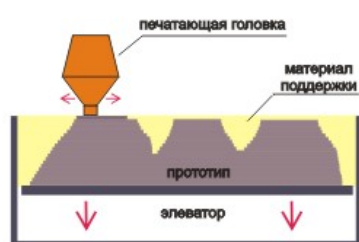


Рис. 5. Схема реализации технологии струйного моделирования

Перечисленные технологии быстрого прототипирования позволяют: оценивать конструкцию и внешний вид разрабатываемых изделий; проверять собираемость и работоспособность конструкций; проводить аэродинамические и гидравлические испытания; получать металлические детали и пресс-формы литьем по выжигаемым моделям (Quick Cast-технология); изготавливать оснастку для опытных образцов и малых серий изделий.

При реализации технологии лазерного спекания порошковых материалов и использовании в качестве формообразующего материала порошкового материала Laser From (нержавеющая сталь — 60%, бронза — 40%) можно изготавливать долговечные функциональные прототипы деталей, а также формообразующие элементы оснастки для термопластавтоматов со стойкостью не менее 100 000 циклов. Сплав Laser From А-6 может подвергаться термообработке с обеспечением твердости до HRC 39. Он предназначен для создания оснастки литья под давлением или термоформовки со стойкостью не менее 1 млн циклов [1].

Достаточно широко используется технология стереолитографии при изготовлении формообразующей оснастки для разных видов литья

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН совместно с МГТУ им. Баумана проводил работы по исследованию возможностей применения пластиковых моделей созданных методом лазерной стереолитографии для изготовления металлических отливок различными способами точного литья. Пластиковые модели из разных видов формообразующих материалов вместе с восковой литниковой системой помещались в керамическую оболочку. После сушки керамики модели выжигались, а в образовавшуюся полость заливался металл. На рис. 6 представлены отливки на литейном дереве после извлечения из литейных форм (б) и после окончательного удаления остатков керамики (в). Разработанная технология литья по выжигаемым моделям изготовленным методом лазерной стереолитографии обеспечивает получение отливок деталей содержащих элементы, размеры которых меньше 1 мм [4].

Этим же институтом Совместно с Ярцевским заводом двигателей и фирмой "Полис Систем" была выполнены работы по созданию оснастки для изготовления

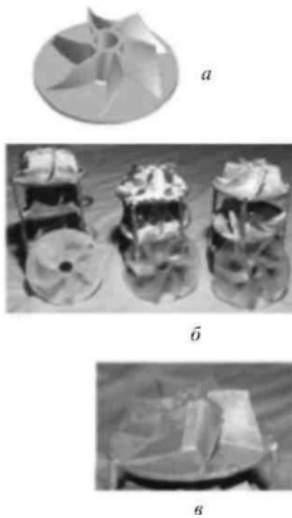


Рис.6: *а* — Компьютерная модель трехмерного объекта, *б* — пластиковые копии объекта и отливки извлеченные из формы на литниковой системе, *в* — отливка после окончательной очистки

крышек автомобильного стартера. Компьютерные модели формообразующих элементов оснастки были созданы по чертежам разработчиков. Изготовленные методом лазерной стереолитографии пластиковые детали использовались для изготовления земляных литейных форм. Чтобы сократить время изготовления и расход ФПК на установке лазерной стереолитографии были выращены оболочки моделей, которые затем заполнялись эпоксидной смолой. По отзывам специалистов завода пластиковые модели выдержали 1000 циклов формовки при температуре 100°C без видимых признаков износа. Применение лазерной стереолитографии позволило существенно сократить срок изготовления формообразующей оснастки и снизить их себестоимость в 2 раза. При этом 3/4 времени ушло на создание трехмерных компьютерных моделей по бумажным чертежам из-за отсутствия на заводе возможностей для трехмерного компьютерного моделирования. На рис.11 показаны элементы оснастки изготовленные методом лазерной стереолитографии. [4]

Технологии быстрого прототипирования заняли прочное место практически во всех областях материального производства в индустриально развитых странах. Прогресс в промышленности этих стран не в последнюю очередь обусловлен стремительным развитием RP-технологий. Однако, уже очевидно, что для отечественной промышленности задача скорейшего освоения RP-технологий, а именно всей цепочки от CAD-данных до отливки и станка с ЧПУ, является стратегически важной.

**Список литературы:** 1. Витязев Ю.Б., Самусь А.В. Прототипирование – «ускоритель» подготовки производства // Оборудование и инструмент для профессионалов. 2006 г. №6. С.40-42. 2. Зорин С.Ф. Обзор технологий быстрого прототипирования // [http://www.espotec.ru/art\\_prot.htm](http://www.espotec.ru/art_prot.htm) 3. <http://rp-salon.ru/main/proto.html> 4. А.В.Евсеев, В.С.Камаев, Е.В.Коцюба, М.А.Марков, М.М.Новиков, В.Я.Панченко. Оперативное формирование трехмерных объектов методом лазерной стереолитографии // Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Сборник трудов ИПЛИТ РАН. Под ред. чл.-корр.РАН В.Я.Панченко и проф. В.С.Голубва. М.: Интерконтакт Наука. 2005. —304 с С. 26-39.

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ ЛАЗЕРНОЙ  
ОБРАБОТКОЙ НИКЕЛЬФОСФОРНЫХ ПОКРЫТИЙ**

**Бутенко В.И., Подножкин Г.В.** (*кафедра механики ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, Россия*)

Проблема повышения стойкости спиральных сверл из быстрорежущей стали остается актуальной в современной металлообработке, особенно в двигателестроении, где широко используются труднообрабатываемые жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы [1].

В лабораториях механики Таганрогского технологического института Южного федерального университета разработана технология повышения стойкости спиральных сверл из быстрорежущей стали диаметром 10 – 24 мм нанесением на их рабочую поверхность никельфосфорного покрытия с последующей лазерной обработкой. Никельфосфорное покрытие наносилось на сверла электролитическим путем при плотности пропускания тока  $i = 80 \text{ мА/см}^2$ . Использовался водный электролит следующего состава: сернокислый никель – 120 г/л, хромистый никель – 20 г/л, гипофосфат натрия – 15 г/л, ортофосфорная кислота – 40 мл/л, борная кислота – 20 г/л.

Заданная толщина никельфосфорного покрытия достигалась временем его нанесения и изменялась в диапазоне ( $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-1}$ ) мм. Измерение толщины покрытия осуществлялось либо на многофункциональном приборе «Константа К5», либо косвенным методом по мощности рефлексов на дифрактограмме, снятой на рентгеновском дифрактометре «Дрон-1,5», с предварительной тарировкой их путем интерполяции зависимости «толщина покрытия – время нанесения».

Импульсное лазерное облучение сверл без покрытия и с никельфосфорным покрытием проводилось на технологических установках «Квант-18» и «ГОС-30М». Изменения энергии излучения, степени дефокусировки луча (3 – 6 мм), длительности импульса излучения ( $(1 - 6) \cdot 10^{-3}$  с) позволили варьировать плотность мощности излучения в широких пределах: от 50 до 250 МВт/м<sup>2</sup>.

Сравнительные исследования стойкости спиральных сверл из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 14 мм проводились при сверлении стали 12Х18Н9Т и сплава 45Х25Н20С2 в сплошном материале на вертикально-сверлильном станке мод. 2А135 без охлаждения. Режимы сверления (скорость резания  $V$  и подача  $S$ ) были приняты следующими: для стали 12Х18Н9Т –  $V = 0,146 \text{ м/с}$ ,  $S = 0,15 \text{ мм/об.}$ ; для сплава 45Х25Н20С2 –  $V = 0,129 \text{ м/с}$ ,  $S = 0,1 \text{ мм/об.}$  Толщина наносимого на рабочую поверхность исследуемых сверл никельфосфорного покрытия составляла  $5 \cdot 10^{-2}$  мм. За критерий износа сверл был принят момент времени их непрерывной работы, при котором в зоне резания появлялся характерный скрип, обусловленный предельным износом сверла на периферии по задней поверхности. Каждый эксперимент повторялся 10 раз, после чего вычислялось среднеарифметическое значение стойкости сверла. Мощность критерия Стюдента составила при сверлении стали 12Х18Н9Т  $t_c = 5,33$ , а при сверлении сплава 45Х25Н20С2  $t_c = 4,18$  при его критическом значении  $[t_c] = 3,0$ .

В исследованиях сравнивалась стойкость сверл без покрытия, упрочненных лазерной обработкой, с электролитическим никельфосфорным покрытием, с никельфосфорным покрытием и объемной термообработкой при температуре 400°С в течение 20 мин., с лазерной обработкой никельфосфорного покрытия.

На рис. 1 приведена гистограмма значений стойкости испытанных сверл, из которой видно, что нанесение на рабочую часть спиральных сверл никельфосфорного покрытия

с последующей их лазерной обработкой позволяет практически в 2 раза повысить стойкость спиральных сверл при обработке исследуемых стали и сплава.

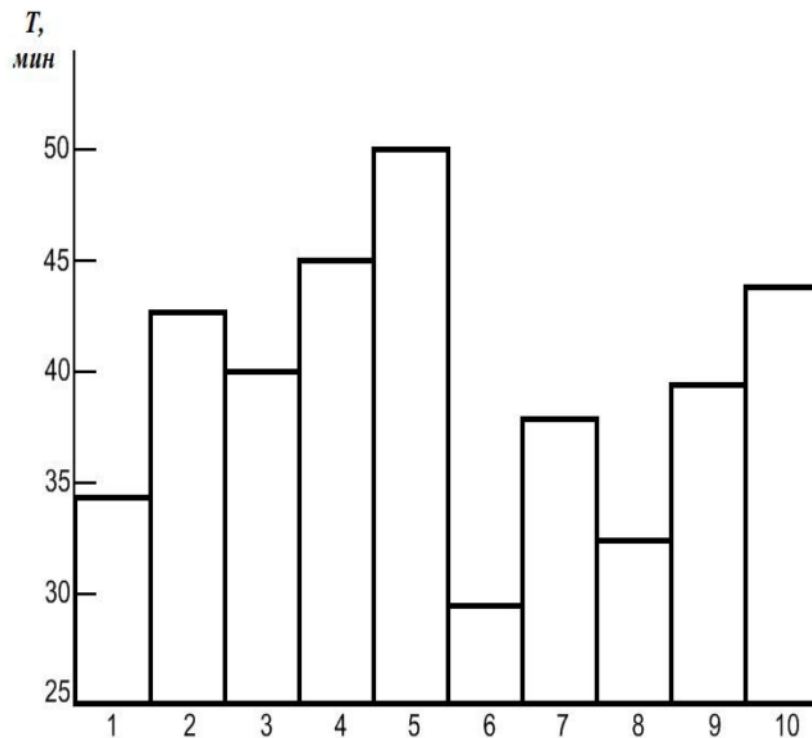


Рис. 1. Гистограмма значений стойкости сверл  $T$  при сверлении стали 12X18H9T (1 – 5) и сплава 45X25H20C2 (6 – 10) без покрытия (1, 6), упрочненные лазерной обработкой (2, 7), с электролитическим никельфосфорным покрытием (3, 8), с никельфосфорным покрытием и объемной термообработкой (4, 9), с лазерной обработкой никельфосфорного покрытия (5, 10)

Совместно проведенный металлографический и рентгеноструктурный анализ никельфосфорного покрытия на быстрорежущей стали Р6М5 показал (рис. 2), что до лазерного облучения покрытие имеет мелкокристаллическую структуру, дающую на дифрактограммах диффузионное гало (рис. 2, линия 1). После лазерной обработки при плотности мощности излучения  $q = 100 \text{ Мвт/м}^2$  на его фоне появляются достаточно четкие рефлексы кристаллических фаз  $\text{Ni}_3\text{P}$  и  $\text{Ni}_5\text{P}_4$ .

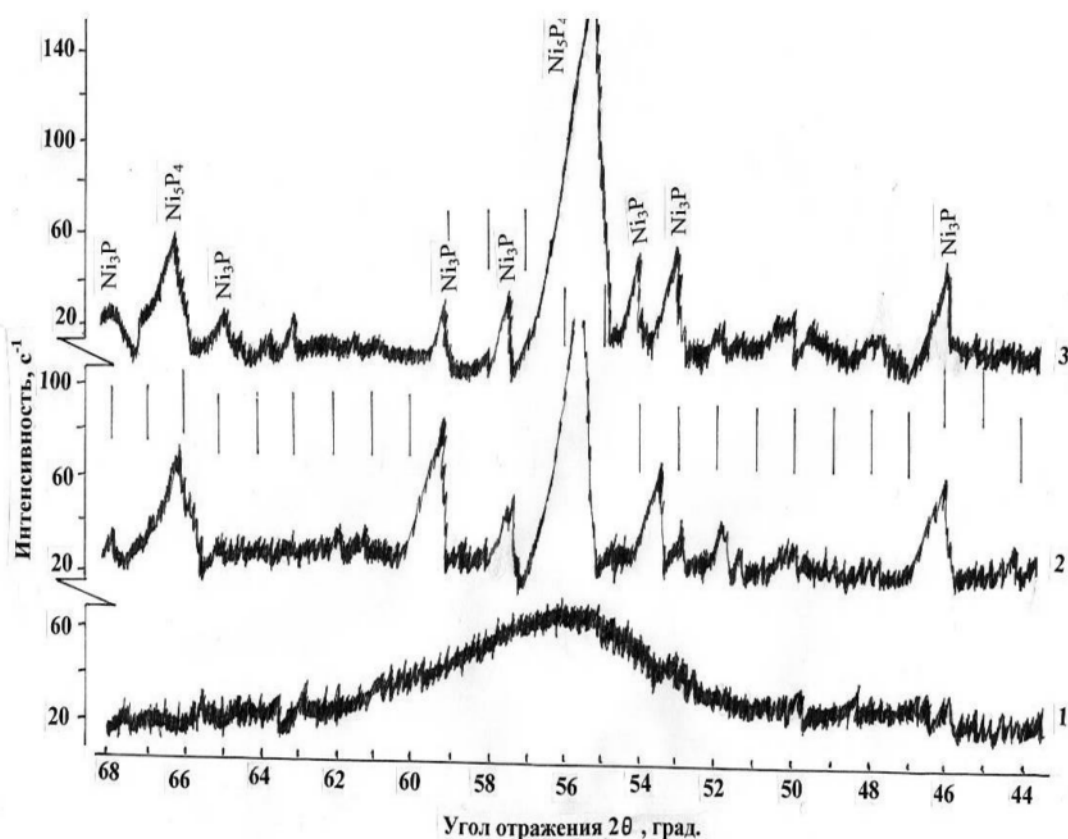


Рис. 2. Фрагменты дифрактограммы никельфосфорного покрытия на быстрорежущей стали Р6М5: 1 – без термообработки; 2 – после лазерной обработки с  $q = 100 \text{ МВт/м}^2$ ; 3 – после объемной термообработки при  $400^\circ\text{C}$  в течение 20 мин.

Установлено, что лазерная обработка позволяет достичь повышения качества электролитических покрытий за счет увеличения адгезии покрытий к подложке или основе, улучшения морфологии поверхности, а также приводит к увеличению твердости покрытия до 8 – 10 ГПа при облучении с плотностью мощности излучения около  $100 \text{ МВт/м}^2$  из-за достаточно высокого количества выделившихся дисперсных соединений типа  $\text{Ni}_3\text{P}$  и  $\text{Ni}_5\text{P}_4$  (рис. 2, линия 2), что в сочетании с незначительным тепловым влиянием на быстрорежущую сталь приводит к минимизации износа режущих кромок инструмента.

Другим важным фактором, влияющим на процесс изнашивания рабочей части сверла, является толщина наносимого никельфосфорного покрытия, которая оказывает неоднозначное влияние на стойкость инструмента (рис. 3). Исследованиями установлено, что для каждого сочетания обрабатываемого материала, никельфосфорного покрытия и условий обработки существует некоторая оптимальная толщина покрытия, обеспечивающая максимальную стойкость сверла. Этот вывод подтверждает ранее высказанное предположение о существовании в парах трения так называемого эффекта «нанотрибологической ямы» [2], учет которого необходим при разработке технологии и режимов нанесения износостойких покрытий.

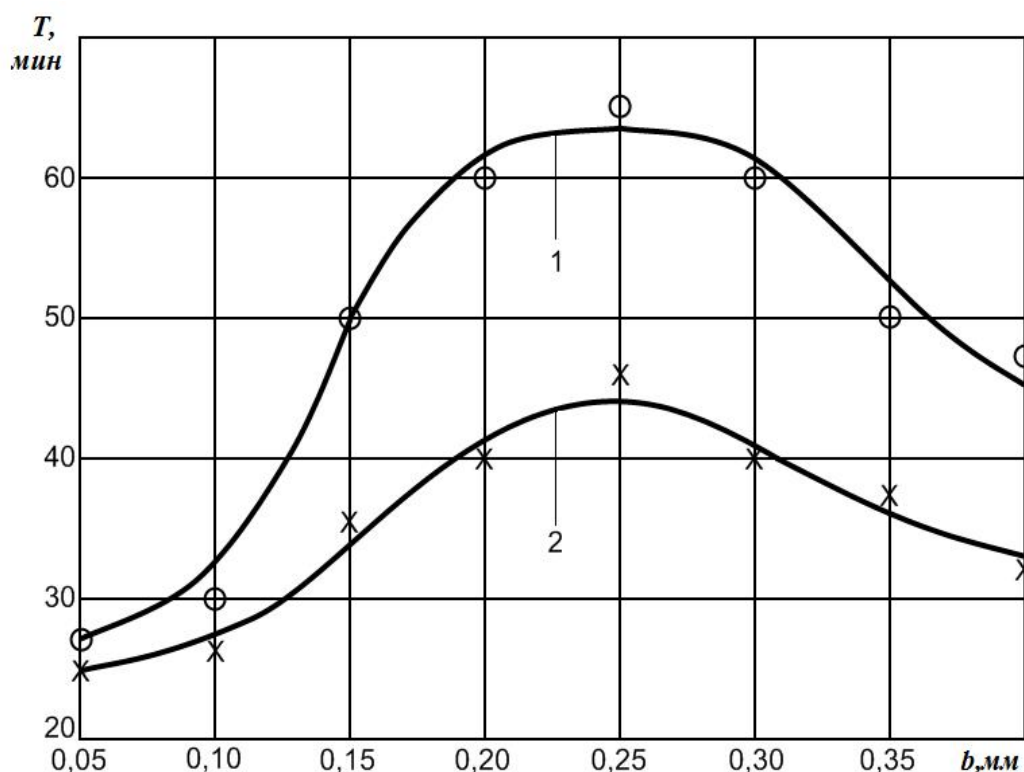


Рис. 3. Изменения стойкости сверл  $T$  от толщины наносимого никель-фосфорного покрытия  $b$  при обработке стали 12Х18Н9Т (кривая 1) и сплава 45Х25Н20С2 (кривая 2)

Было установлено, что эффект «нанотрибологической ямы» может быть использован для повышения производительности обработки деталей в условиях автоматизированного производства или при использовании обрабатывающих центров, когда требуется обеспечение одновременной смены всех инструментов в наладке [3]. Так, использование в инструментальных наладках обрабатывающих центров АГП 630-800 – 1.3, АГПН 630-800 – 1.3, АГП 630-800 – 2.3, входящих в гибкий производственный комплекс ГПК-1 завода «Роствертол», инструментов (сверл, зенкеров, разверток и концевых фрез различных размеров) с никельфосфорными покрытиями, толщины которых были рассчитаны и откорректированы в соответствии с эффектом «нанотрибологической ямы», позволило повысить производительность комплекса при обработке сложно-профильных деталей более, чем на 15%.

**Список литературы:** 1. Бутенко В.И. Структура и свойства материалов в экстремальных условиях эксплуатации. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 264 с. 2. Бутенко В.И. Управление нанотрибологическими характеристиками тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 385 с. 3. Бутенко В.И. Технологическое обеспечение конкурентоспособности изделий авиастроения (авторский курс). – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 295 с.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЗКИ МЕТАЛЛОПРОКАТА



Демин В. П., Коваленко В.И., Демин А.С. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Обработка резанием по-прежнему остается основным технологическим приёмом изготовления деталей машин. Трудоёмкость механосборочного производства в большинстве отраслей машиностроения значительно превышает трудоёмкость литейных, ковочных и штамповочных процессов вместе взятых.

Основная трудность, с которой сталкиваются при обработке резанием – это чрезмерно большие припуски, оставляемые на обработку вследствие невысокой точности заготовительных операций (отрезки, литья,ковки, штамповки и др.), что удорожает и усложняет процессы механической обработки. Это становится всё более важным, т.к. с каждым годом усложняются конструктивные формы деталей и возрастают требования к точности и качеству их изготовления

Наиболее известными методами разделительной резки заготовок являются следующие:

- Дисковыми пилами (фрезами) на круглопильных станках;
- Ножовочными полотнами на механических ножовочных станках;
- Резцами или фрезами на специальных отрезных станках;
- Абразивными (вулканитовыми или алмазными) кругами;
- Ленточными пилами на ленточнопильных станках.

До последнего времени в промышленности используются дисковые пилы, которые обладают высокой производительностью, обусловленной непрерывностью процесса резки и высокой жесткостью системы СПИД. Недостатками этого метода являются необходимость частой переточки инструмента, высокая энергоемкость процесса и, главным образом, большая ширина пропила. Так, например, дисковая пила диаметром  $\varnothing 710,8$  мм. образует пропил 7мм, что вызывает большие отходы металла в стружку. Резка заготовок механическими ножовками обеспечивает более узкий пропил (2,0-3,5 мм), но при этом меньшая жесткость ножовочных станков и наличие холостых (обратных) ходов инструментов в процессе пиления ограничивает габаритные размеры заготовок и снижает производительность в 3-4 раза по сравнению с круглопильными станками.

Стремление совместить преимущества рассмотренных видов обработки и привело к созданию инструмента и станков для ленточного пиления. В настоящее время можно констатировать, что ленточное пиление является одним из самых перспективных видов ресурсосберегающих технологий при обработке материалов резанием.

Узкая ширина пропила и непрерывность резания определяют преимущества этого метода:

- Минимальное количество потери материала в стружку;
- Низкое энергопотребление процесса;
- Возможность получения точных заготовок с окончательным размером или с минимальным припуском для последующих операций;
- Высокая производительность отрезки;
- Универсальность метода и возможность обработки на одном станке любых материалов и конфигураций заготовок.

Резание на ножовочном станке целесообразно производить только при порезке тонкостенных труб и профилей с площадью поперечного сечения  $\leq 2\text{см}^2$ . С увеличением

толщины стенок предпочтительнее порезка дисковыми и ленточными пилами. Ленточнопильная обработка в этих случаях эффективнее дисковых пил – один рез экономит порядка 1,5-2 у.е. и оказывается на 40-50% дешевле отрезки дисковыми пилами.

Режущим инструментом на ленточнопильных станках является ленточная пила – сваренная в кольцо стальная полоса, имеющая режущие зубья. При этом важнейшим фактором, определяющим всю эффективность процесса ленточного пиления, является режущая способность и долговечность ленточной пилы.

В качестве материала основы биметаллических пил используется сталь марки 7HS34 (по AISI) или её аналог, разработанный с учётом необходимых свойств – лента холоднокатаная из стали 45ХГНМФА по ТУ 14-4-1401-87 (РБ).(таблица 1) Производитель ленты СП «Бакко Бисов» (Беларусь).

Таблица. 1. Химсостав и твердость материала биметаллических пил

Сталь	C	W	Mo	Co	V	Cr	HRC
H2 P6M5	0,85	6,3	5,0	-	2,0	4,0	64-66
Матрикс II	0,73	1,5	5,0	8	1	4,2	67-68
M42 11P2M10K	1,08	2,0	10	8	1	3,8	68-69
MS1 12P10M4K1	1,25	10	4	10	3	3,5	≥69
7HS64 45ХГНМФА	0,37-0,44	-	0,7	-	0,3	3,0	48-52

Одной из важнейших проблем эксплуатации пил ленточнопильных станков является правильное натяжение ленты пилы, а также обеспечение оптимальной загрузки ленты и пильных зубьев в зоне разрезания. Длина этой зоны изменяется при разрезании валов, а также профильных материалов с переменным сечением. [1]. В ленточнопильных станках с замкнутой лентой, предназначенных для разрезания металлов, применяются 2 ленточнонаправляющих желоба, скручивающие ленту в зоне резания на 90°, они закреплены в раме с устройством натяжения ленты.

Величина амплитуды перемещений поперечных колебаний ленточной пилы зависит от многих параметров, в том числе от натяжения и скорости движения. На высоту гребешков и форму неровностей обработанной поверхности оказывают влияние разводка, подача, геометрические параметры режущей части и колебания инструмента (рис.1).

Вследствие разводки зубьев пилы и ее поперечных колебаний невозможно получить идеально гладкую обработанную поверхность, так как на ней всегда остаются следы резцов – зубьев и разрывов в металле, образующие неровности в продольном и поперечном направлениях [2].

Выбор правильных геометрических параметров инструмента - необходимый и важнейший этап разработки технологического процесса ленточного пиления. При одном и том же материале заготовки и марке ленточной пилы могут быть достигнуты результаты, отличающиеся по качеству реза и стойкости пил в несколько раз. Нагрузка на пильное полотно и на каждый режущий зуб, условия стружкоотвода и уровень контактных напряжений рабочих поверхностях инструмента и заготовки, устойчивость

пилы и производительность резания – все эти факторы решающим образом зависят от геометрических параметров пил.

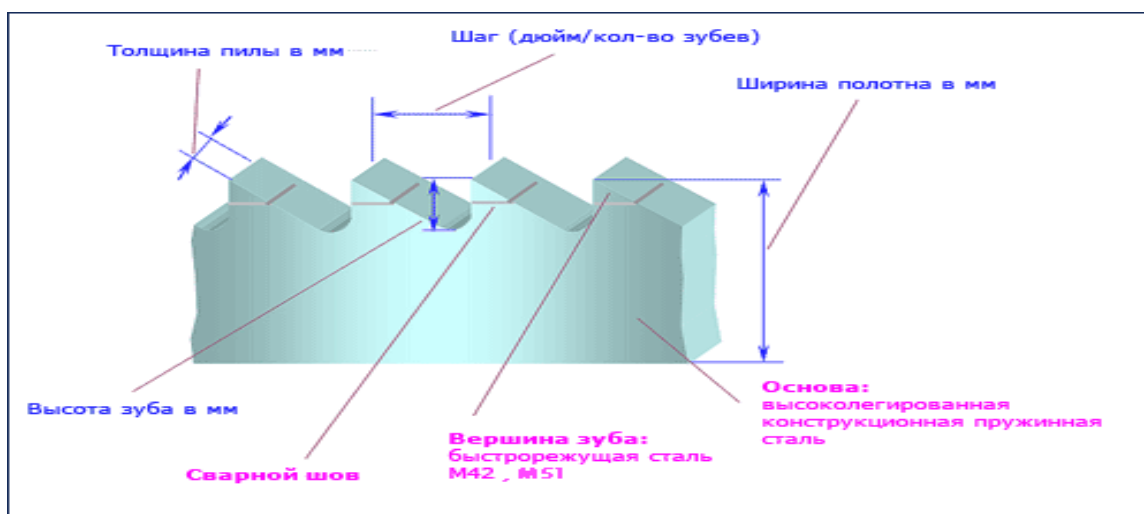


Рис. 1. Геометрические параметры ленточной пилы

Порезка твердых материалов требует применения пил с большим количеством зубьев для лучшего распределения и уменьшения припуска на зуб (таблица 2).

Таблица 2. Рекомендованное количество одновременно работающих зубьев

Количество зубьев, одновременно находящихся в материале	Материалы нормальной обрабатываемости	Материалы повышенной твердости
Минимум	3	6
Максимум	24	36
Оптимально	6-12	12-24

Принципиальные моменты при выборе размеров пил, формы и шагов зубьев таковы:

- Необходимо использовать пилы только той длины и ширины полотна, которые указаны в техническом паспорте ленточнопильного станка.
- При прочих равных условиях и возможностях, используются пилы с большей шириной полотна, что положительно отражается на качестве реза и устойчивости процесса пиления.
- При порезке мягких материалов следует использовать пилы с большими шагами и объемом стружечных канавок.

Реализация высокого технологического потенциала процесса ленточного пиления возможна только при использовании станочного оборудования, отвечающего всем требованиям этого процесса по жесткости конструкции, возможности изменения в широком диапазоне скоростей подачи и резания, наличие приспособлений и устройств, позволяющих оперативно осуществлять различные рабочие и вспомогательные операции, а также обладающего достаточной долговечностью, мощностью, производительностью и простотой управления. К таким станкам, обладающими высокой точностью и надежностью, относятся станки фирмы **MEP SPA (Италия)** (рис.2).



Рис.2. Станок фирмы MER SPA (Италия)

Официальный представитель фирмы MER в Украине **ООО «ПТП «ТОР-2000» г.Донецк**. MER является мировым лидером в производстве стандартных и специализированных ленточнопильных станков. Отличительной особенностью станков MER S.p.A является - точность реза, надежность, производительность, эргономичность. Эти высокие эксплуатационные показатели достигнуты путем внедрения собственных "ноу-хау" и передовых инженерных решений. Только на станках MER консоль и станина выполнены из мягкого, ковкого чугуна с противорезонансными разрезами, встроенными системами диагностики и контроля, позволяющими гасить вибрации и тем самым повышать ресурс и сохранность пил.

Станки оборудованы:

- Системой контроля реза;
- Цифровым датчиком усилия натяжения полотна;
- Усиленными направляющими;
- Быстродействующим устройством для зажима и разжима заготовки;
- Щеткой для очистки пилы от стружки;
- Подающим суппортом с роликами.

Правильный выбор оборудования, инструмента, режимов резания позволяет добиться высокой производительности, требуемого качества реза, экономии материальных ресурсов и в конечном итоге конкурентоспособности производства.

**Список литературы:** 1.Адамчук Я., Войнаровски Ю., Калински В. Проблемы нагрузки ленточной пилы распиловочного станка с замкнутой лентой. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов - Донецк: ДонНТУ, 2003г. Вып.25. С.3-7. 2 Войнаровски Ю., Калински В. Анализ колебаний ленточной пилы распиловочного станка с замкнутой лентой. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2003г. Вып.25 С.3-7. 3. Элимелак С.З. Технология ленточного пиления. ООО «ТМ АРГО-ГРАФИКС», Минск, 2006г. 4. MER SPA ITALY CATALOG 2008.

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРОГРЕССИВНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ  
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

**Михайлов А.Н., Михайлов Д.А.** (*кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина*)

Непрерывный процесс научно-технического прогресса постоянно требует совершенствования современных технологий, в том числе и технологий машиностроения. При этом они в своем развитии проходят многосторонние преобразования, обычно значительно усложняются и приобретают новые свойства и возможности. Этому способствуют исследования фундаментального и прикладного характеров. Вместе с тем, в основе их развития лежат общие тенденции действующие в технике, а также новые принципы, возникающие благодаря прогрессу науки и техники.

К новым и перспективным тенденциям прогрессивного развития технологий машиностроения [1] можно отнести следующие:

- повышение концентрации и параллелизма технологических зон обработки, обеспечивающих повышение производительности и новых возможностей технологических систем [2];

- создание нетрадиционных прогрессивных пространственных структур технологических зон обработки (создание многомерных циклических структур, повышение размерности многообразия и объектов в каждом многообразии структуры), реализующих повышение технологических возможностей пространства и среды [2];

- обеспечение компоновки технологических зон обработки в линейные, поверхностные и объемные структуры (рис.1); обеспечение компоновки этих структур в производственные ячейки (поточно-пространственные технологические модули) (рис.2); обеспечение компоновки производственных ячеек в пространственные структуры и заполнение ими всего объема пространства производственного цеха с возможностью изменения их пространственного расположения (рис.2);

- повышение степени компактирования структуры за счет увеличения плотности (линейной, поверхностей, объемной) технологических зон обработки;

- создание новых классов технологических машин [2], разработка и функционирование которых базируется на основе новых принципов;

- организация поточности функционирования технологических зон обработки на основе многомерных замкнутых рекуррентных групп, выполняемых на базе их сложных транспортных движений и повышения интенсивности;

- обеспечение одновременности или параллельности выполнения функций технологических систем;

- повышение непрерывности и устойчивости функционирования технологических систем в соответствии с заданным алгоритмом;

- повышение информативности технологий, снижение массы технологических систем и повышение их энерговооруженности;

- создание технологий и технологических систем с использованием принципов мехатроники и адаптроники;

- упрощение функциональной структуры за счет совмещения различных функций технологических систем, выполнение технологических функций посредством транспортных функций и наоборот.

Анализируя эти тенденции можно отметить, что в настоящее время перспективным является переход от линейных компоновок к поверхностным и объемным компо-

новкам. На рис. 1 показана: а – линейная компоновка технологических зон, б – поверхностная компоновка, в – объемная компоновка. Здесь обозначено: 1 – входные потоки изделий, 2 – поток единичных технологических зон, 3 – единичная технологическая зона, 4 – изделие (предмет обработки), 5 – пространственная технологическая зона, 6 – выходные потоки изделий. Буквами показано:  $v_{Ti\eta}$  – транспортная скорость изделий и  $h_i$  – шаг изделий.

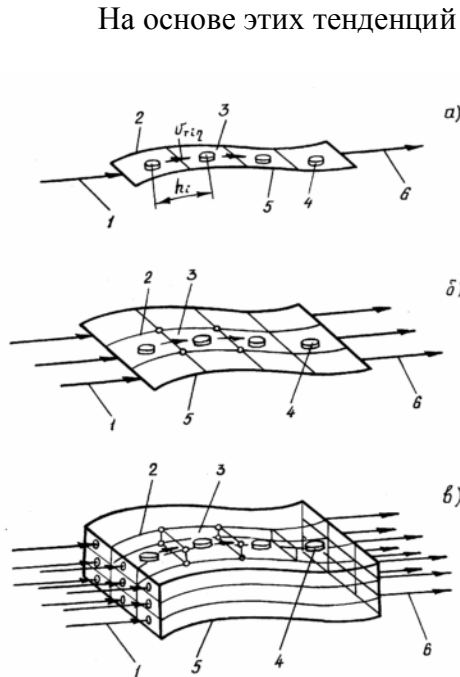


Рис. 1. Модели пространственных технологических зон: а – линейная; б – поверхностная; в – объемная

Теоретическая производительность их определяется по следующим зависимостям:

- линейно-пространственная технологическая зона

$$\Pi_i^L = \frac{L_i}{T_o h_i} = v_{Ti\eta} P_{Li} = N_{Li}; \quad (1)$$

- поверхностно-пространственная технологическая зона

$$\Pi_i^S = \frac{S_i}{T_o S_{Si}} = b_{oi} v_{Ti\eta} P_{Si} = b_{oi} N_{Si}; \quad (2)$$

- объемно-пространственная технологическая зона

$$\Pi_i^V = \frac{V_i}{T_o V_{Ei}} = s_{oi} v_{Ti\eta} P_{Vi} = s_{oi} N_{Vi}, \quad (3)$$

где  $\Pi_i^L, \Pi_i^S, \Pi_i^V$  – теоретическая производительность технологической системы с линейной, поверхностной и объемной зоной соответственно;

$L_i, S_i, V_i$  – длина, площадь, объем технологических зон соответственно;

$h_i, S_{Ei}, V_{Ei}$  – длина (шаг), площадь, объем единичной технологической зоны соответственно;

$T_o$  – длительность основного времени технологического воздействия орудий и средств обработки на изделие;

$b_{oi}, s_{oi}$  – ширина, площадь поперечного сечения технологической зоны соответственно;

$P_{Li}, P_{Si}, P_{Vi}$  – линейная, поверхностная, объемная плотность изделий в соответствующих технологических зонах;

$N_{Li}, N_{Si}, N_{Vi}$  – интенсивность потоков изделий соответственно в линейной, поверхностной и объемной пространственной технологических зонах.

Здесь:

$$P_{Li} = \frac{1}{h_i}, \quad P_{Si} = \frac{1}{S_{Ei}}, \quad P_{Vi} = \frac{1}{V_{Ei}}.$$

На основании выражений (1), (2) и (3) установлена зависимость относительной производительности  $\Pi/\Pi_o$  технологических модулей непрерывного действия, где  $\Pi_o$  – теоретическая производительность базового варианта, от их геометрических параметров в пространственных технологических зонах (рис. 2). Анализ этих зависимостей показал, что увеличение габаритных размеров технологического модуля ведет к увеличению его производительности по следующим законам: с линейной технологической зо-



ной (график 1) – по прямой пропорциональной зависимости, с поверхностной технологической зоной (график 2) – по квадратичной зависимости, с объемной технологической зоной (график 3) – по кубической зависимости. Поэтому технологическим системам с поверхностной и объемной технологическими зонами свойственны качественно новые, более высокие технико-экономические показатели по сравнению с технологическими системами с линейной компоновкой, на базе которой создаются современные автоматические линии.

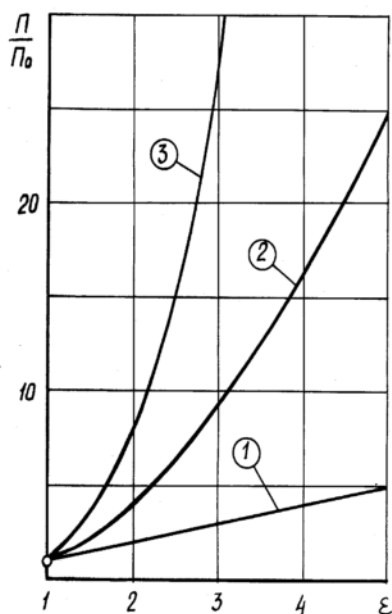


Рис. 2. Зависимость относительной производительности технологической системы от габаритных размеров пространственной технологической зоны

шения плотности поточно-пространственных технологических модулей в производственных ячейках и ячеек в производственном цеху. На рис.3 показана формализованная объемно-пространственная производственная ячейка. Здесь 1 – технологическая система, 2 – поточно-пространственный технологический модуль, 3 – связь между технологическими модулями, 4 – граница производственной ячейки, 5 – граница поточно-пространственного технологического модуля. Модульность построения поточно-пространственных технологических систем позволяет реализовать основные принципы автоматизированных производств. Это, прежде всего гибкость, непрерывность и высокие технико-экономические показатели изготовления изделий. Однако процесс создания таких технологий это сложный процесс, который требует длительных исследований фундаментального и прикладного характера.

Важным моментом при проектировании технологических систем является увеличение коэффициента использования технологического пространства на всех иерархических уровнях:

$$K_R = \frac{V_k}{V_{OR}},$$

где  $K_R$  – коэффициент использования технологического пространства на  $R$  уровне;

$V_k$  – объем пространства в котором располагается технологическое оборудование (технологические элементы);

$V_{OR}$  – общий объем пространства, ограничивающий функциональную единицу.

При этом необходимо стремиться к повышению плотности технологических элементов пространственной технологической зоны и интенсивности функционирования поточно-пространственных технологических модулей. Кроме того, при проектировании технологических систем, состоящей из  $n$  поточно-пространственных модулей, необходимо пространственно их компактировать в производственные ячейки (рис. 3) и затем ячейки пространственно компоновать во всем объеме производственного цеха. Причем здесь также следует вести их размещение из расчета повышения

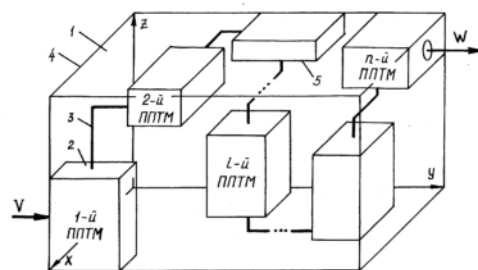


Рис. 3. Формализованная объемно-пространственная производственная ячейка

На основе предлагаемых тенденций развития технологий и разработанного теоретического подхода в создании и функционировании высокоэффективных технологических систем [1] разработаны качественно новые поточно-пространственные технологические системы непрерывного действия [2]. Эти технологические системы относятся

к новому 5-му классу технологических машин [2] нового поколения.

Основным при создании поточно-пространственных технологических систем является переход от линейной компоновки к поверхностной и затем к объемной компоновке технологических элементов (рис.4). Здесь каждый вид, из трех предлагаемых, имеет открытое множество вариантов геометрических форм компоновок, что дает возможность создавать значительное число вариантов технологических систем и выявлять наиболее приемлемые для реализации заданного технологического процесса.

Для решения вопросов компоновки поточно-пространственных технологических систем предложен метод синтеза принципиально-структурных моделей, на базе которых разрабатываются компоновочные варианты технологических систем [4]. В основу

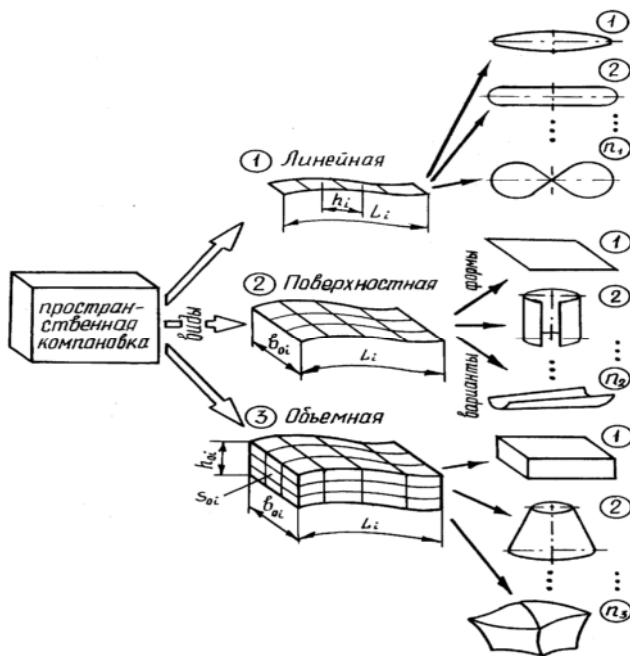


Рис. 4. Виды и геометрические формы компоновок пространственных технологических зон

этого метода положена операция декомпозиции пространственной структуры и сложной принципиальной кинематической схемы транспортного движения [2]. На базе этого метода разработаны некоторые варианты поточно-пространственных технологических модулей с подсистемами 2-го класса, а именно: поточно-винтового технологического модуля (ПВТМ), поточно-спирального технологического модуля (ПСТМ), поточно-пространственного технологического модуля (ППТМ) и поточно-глобоидного технологического модуля (ПГТМ).

Таким образом, разработанный новый теоретический подход и новые принципы позволяют на строгой методологической основе объектно-ориентированного проектирования создавать нетрадиционные прогрессивные технологии. Это позволяет существенно повысить технико-экономические показатели изготовления изделий машиностроения на базе технологий и технологических систем нового поколения.

**Список литературы:** 1. Михайлов А.Н. Закономерности эволюционного процессе развития технологий машиностроения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. научн. статей.- Донецк: ДонГТУ, 1995, Вып. 2. С. 32-49. 2. Михайлов А.Н. Разработка методов проектирования высокоэффективных поточно-пространственных технологических систем. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев: КПИ, 1992.-33с. 3. Михайлов А.Н. Общий теоретический подход создания новых прогрессивных технологий // Прогрессивные технологии машиностроения и современность: Сб. трудов междунар. научно-техн.конф.- Донецк: ДонГТУ, 1997. С. 168-171. 4.



Михайлов А.Н. Новая концепция развития технологических систем непрерывного действия // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сб. научно-техн. тр.-Донецк: ДонГТУ, 1994, Вып. 1, С. 74-91. 5. Михайлов А.Н. Перспективы развития высоких технологий // Резание и инструмент: Республ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: ХПИ, 1993, Вып. 48, С. 39-41.

## ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ

**Соловьёв С.Ю., Медведев В.В.** (*кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина*)  
*vadim.medvedev@ua.fm, atum.org.ua*

Широкое внедрение в механообработке обрабатывающих центров предъявляет повышенные требования к диагностической системе такого оборудования. Система должна обеспечивать автономность работы оборудования в течении определённого промежутка времени. Автономность работы в частности подразумевает отсутствие контроля со стороны станочника. Таким образом, для бесперебойной работы требуется контролировать не только состояние узлов станка и характеристик процесса резания заготовки, но и работу манипуляторов, механизированной оснастки, автоматизированной системы уборки отходов и т.д. Комплексный подход к контролю этих устройств может обеспечить промышленная фоторегистрация [1,2].

Промышленная фоторегистрация – это процесс регистрации промышленных процессов на производстве и контроль за технологическим процессом с помощью фотоснимков. Процесс является частью диагностики технологических процессов.

Развитие алгоритмов обработки научных фотоснимков полученных через разные светофильтры, виртуальных студий, систем искусственного зрения позволяют убирать шумы, увеличивать контурную резкость, выделять из фотографии нужные объекты, определять их вектор движения.

Фотоконтроль позволяет производить контроль промышленной продукции, в ходе которого телевизионные устройства позволяют бесконтактным способом контролировать размеры и конфигурацию изготавливаемых изделий, наличие дефектов и др. без задержки или остановки производственного процесса. Диагностика на основе фоторегистрации позволяет установить, насколько правильно установлена деталь (точность установки, соосность), выявить ошибки манипулятора, большие отклонения от формы (например, значительные выступы на детали).

Техническое оснащение фоторегистрации на сегодняшний день не представляет затруднений. Существует множество приборов и устройств для осуществления контроля технологического процесса с помощью фоторегистрации [3]. Рассмотрим несколько таких устройств.

*Регистратор сигналов РИЦ822 [4].* Регистратор сигналов РИЦ822 может быть эффективно использован для фоторегистрации различных процессов [4]. В качестве примера рис.1а иллюстрирует процесс пробивания отверстия в плоской металлической мишени толщиной 1,5 мм импульсами лазерного излучения, следующими с частотой 10 Гц (излучение идет справа налево).



Рис. 1. Кадры регистрации пробивания отверстия лазерным лучом

На рисунке видно, как первый импульс образует кратер на поверхности мишени; второй импульс сопровождается интенсивным выбросом материала мишени навстречу лазерному лучу; третий импульс пробивает отверстие (факел виден с обеих сторон мишени); четвертый импульс беспрепятственно проходит сквозь образовавшееся отверстие.

Рис. 1б иллюстрируют характер пробоя импульсом излучением  $\text{CO}_2$ -лазера воздуха с различной концентрацией пыли. Съемка велась внутри специальной камеры. Пробой на верхнем кадре (излучение идет слева направо) характерен для обычного воздуха лаборатории. Он носит довольно протяженный характер. Пробой на нижнем кадре характерен для обеспыленного воздуха (концентрация пыли в камере была понижена примерно на три порядка). Отчётлива видна разница в снимках, что позволяет говорить о перспективах фоторегистрации при физико-механических методах обработки.

*Устройство фоторегистрации быстропротекающих процессов [5].* Аппаратура для высокоскоростной фоторегистрации быстропротекающих процессов разработанная под руководством Татмышевский К.В. может успешно применяться:

- для фоторегистрации быстропротекающих процессов в машиностроении, когда необходима высокая скорость реагирования;
- для регистрации процессов перемещения быстро движущихся деталей и узлов в машиностроении;
- при ударных испытаниях изделий авиакосмической техники;
- при баллистических исследованиях;
- для фоторегистрации процессов смесеобразования в системах электронного впрыска топлива в двигателях внутреннего сгорания.

В устройстве применяется 4 лампы-вспышки, которые дают вспышки длительность около 1 мкс. Интервал между сериями вспышек и сами серии могут длиться от 1 мкс до 10 секунд. Питается устройство от стандартной электрической сети 220 В, 50 Гц.

*Задачи, решаемые с помощью фоторегистрации.* Фоторегистрация является достаточно медленным процессом. Время между двумя замерами исчисляется секундами. Поэтому с помощью фоторегистрации не представляется возможным регистрация быстропротекающих процессов, таких как ускоренные ходы рабочих органов станка,

контроль оборотов шпинделей и деталей, движение стружки скола и т.п. В тоже время фоторегистрация, за счёт высокой разрешающей способности, позволяет выполнять контроль размеров и расположения деталей, находящихся в покое. Таким образом, с помощью фоторегистрации в гибком автоматизированном производстве возможно выполнять:

⇒ в процессе наладки обрабатывающего центра:

- контроль наличия автоматически установленной оснастки;
- контроль штрих-кода установленной оснастки;
- контроль внешних повреждений оснастки;
- контроль наличия автоматически установленного инструмента;
- контроль штрих-кода установленного инструмента;
- соответствие вида инструмента штрих-коду;
- контроль износа инструмента [6];

⇒ в процессе установки/снятия детали:

- контроль наличия заготовки в манипуляторе;
- контроль положения заготовки в манипуляторе;
- контроль положения заготовки при зажатии в оснастке;
- измерение геометрии готовой детали;
- контроль передачи готовой детали манипулятору;

⇒ в процессе обработки:

- контроль поломки инструмента;
- контроль загрязнённости рабочей зоны сливной стружкой.

Фоторегистрация, в отличие от промышленного телевидения, позволяет проводить съёмку с высоким разрешением. Например, применение матрицы разрешением 10 МП (мегапикселей) позволяет получать кадры, шириной в 3700 пикселей, а 20 МП – 5200. Физический размер, который возможно измерить с помощью фоторегистрации зависит не только разрешение матрицы, но и от реального размера объекта, который можно снять на заданном расстоянии  $L$ . Если принять, что минимальная теоретическая погрешность измерения геометрических величин соответствует размеру пикселя, в пересчёте на размер реального объекта, то погрешность равна:

$$\Delta = \frac{L}{4 \cdot \sqrt{\frac{MP}{12}}} \text{ мм}, \quad (1)$$

где:  $L$  – реальная ширина калибрующего объекта, габариты которого соответствуют рамке кадра, мм;

$MP$  – общее количество пикселей в матрице.

По формулы (1) получаем графики минимальной теоретической погрешности, приведённый на рис.2.

мм

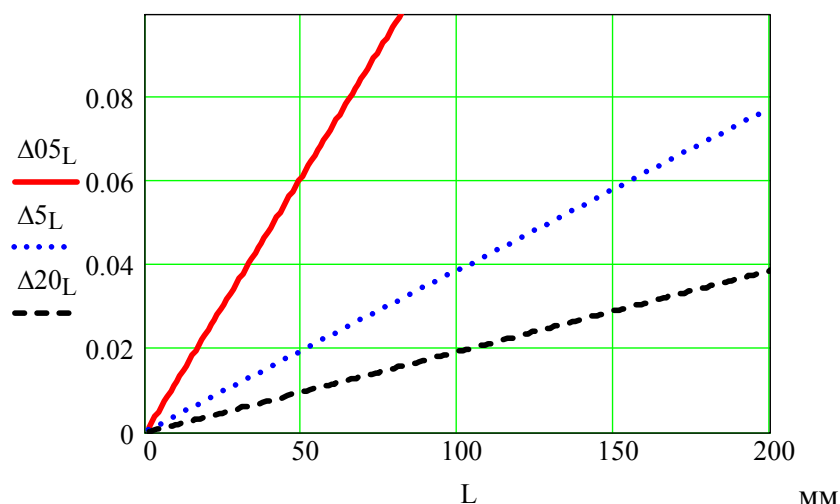


Рис. 2. Графики теоретической погрешности геометрических измерений при фоторегистрации

На графике сплошной линией показана погрешность при видеорегистрации. Точечная линия соответствует применению распространенных матриц с количеством пикселей 5 МП, а штриховой – применение передовых технологий в 20 МП. Как видно, применение длиннофокусных объективов позволяют добиться точности измерений в 10-20 мкм уже на матрице с 5МП.

Процесс обработки фотографий для контроля технологической зоны зачастую не требует применение тяжело настраиваемых алгоритмов искусственного интеллекта. Например, для контроля наличия детали в захвате манипулятора возможно применить алгоритм, основывающийся на стандартных операциях с изображением, приведённые на рис. 3.

Для регистрации детали выполняется опорная фотография гарантировано свободной от деталей рабочей зоны (рис.3а). После чего начинается фотографирование процесса, один из контрольных кадров которого представлен на рис.3б. Вычитая эти фото из опорной фотографии, получаем тёмные участки на тех местах, где кадр полностью соответствует опорному, как показано на рис.3в. Используя полученные тёмные участки как маску для вырезания изображения из контрольной фотографии в итоге получаем изображение только изменений в рабочей зоне. На рис.3г это только деталь, которая была внесена в рабочую зону станка и закреплена в патроне.

По фотографии на рис.3г возможно вычислять наличие детали в зоне обработки. Для этого вычисляется количество заполненных пикселей (площадь закраски) и сравнивается с поперечной кадру площадью фотографии. Вычисление геометрического центра заполненных пикселей позволят контролировать расположение детали в рабочей зоне. Более сложные алгоритмы обработки изображения могут дать информацию о наличии крена детали и соответствие её формы чертежу.

**Вывод.** С помощью фоторегистрации можно осуществлять диагностику технологических процессов, не только на самом обрабатывающем центре, но и на всём пути движения детали по гибкому автоматизированному участку. Использование фоторегистрации позволяет увеличить качество продукции, уменьшить количество сбоев автоматизации манипуляторов и обрабатывающих центров, снизить количество брака, выявить недостатки производства. Разработки в этой области являются очень важными в развитии машиностроения.

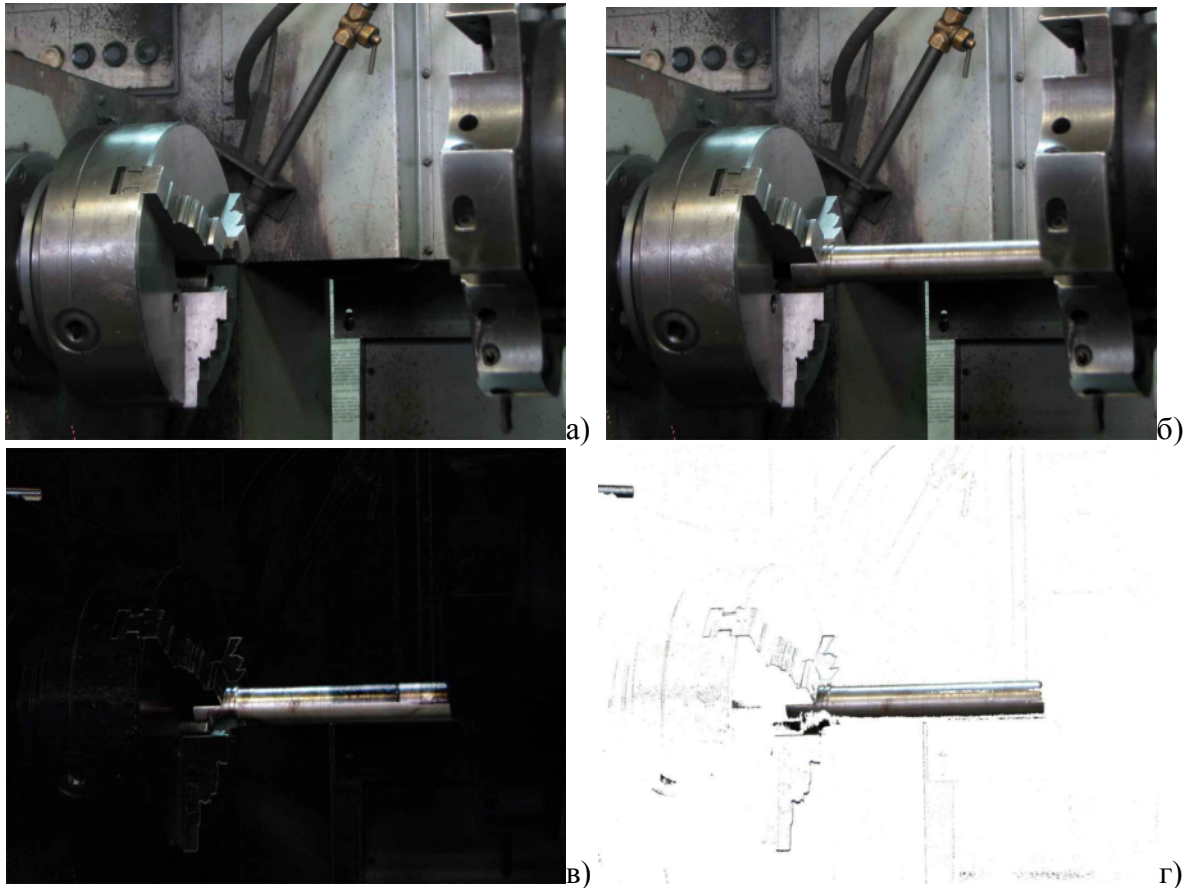


Рис. 3. Автоматическое выделение детали в системе промышленной фоторегистрации

**Список литературы:** 1. Диагностика и неразрушающий контроль продукции машиностроения / ЦНИИ технологии машиностроения; науч. ред. В.И. Иванов. – М.: НПО ЦНИИТмаш, 1988. – 132с. 2. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки / В.А.Остафьев, В.С.Антонюк, Г.С.Тымчик – К.: Техника, 1991. – 151с. 3. Кулагин С.В. Аппаратура для научной фоторегистрации и киносъемки. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. – 1990г. – 192с. 4. Лазеры и метрология. Фоторегистрация [Электронный ресурс] – М. ООО "Ламет", – 2011 – Режим доступа: <http://www.lamet.ru/3386564047> – Заголовок с экрана. 5. Татмышевский К.В. Аппаратура для высокоскоростной фоторегистрации быстротекущих процессов [Электронный ресурс] / К.В.Татмышевский, С.А.Козлов, А.С.Григорьев // Владимир: ВГУ. – 2011. – Режим доступа: <http://piit.vlsu.ru/fotoregistration.html> – Заголовок с экрана. 6. Деревянченко А.Г. Система интеллектуального анализа изображений зон износа режущих инструментов / А.Г.Деревянченко, О.Ю.Бабилунга, Д.А.Криницын // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-технический сборник. – Х., 2010. – С.75-80.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МАГНИТНО – АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА  
ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИКИ****Сухоручко Е.С., Гусев В.В.,** *(каф МСиИ, ДонНТУ, Донецк, Украина)***Введение**

Под керамикой понимаются поликристаллические материалы, получаемые спеканием неметаллических порошков природного или искусственного происхождения. Керамические материалы выгодно отличаются от металлических и полимерных высокой коррозионной стойкостью и возможностью регулирования свойств материала в широких пределах за счет изменения структуры. Керамические материалы наряду с высокой твердостью, как правило, имеют повышенную хрупкость, низкое сопротивление изгибу и ударным нагрузкам. Среди современных керамических материалов – оксид алюминия находит самое широкое применение. Существует множество различных керамических групп, которые различаются количеством оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) в составе материала. Чем ниже доля  $Al_2O_3$ , тем большее количество  $SiO_2$ ,  $CaO$  и  $MgO$  и других примесей в форме силикатов и шпинелей содержится в составе материала. В зависимости от состава и доли чистого  $Al_2O_3$  изменяются свойства конечного керамического материала. Так например с растущей долей  $Al_2O_3$  в составе увеличивается прочность материала на изгиб, модуль упругости, теплопроводность. Основные свойства материала: очень высокая прочность, высокая твердость, стабильность при высоких температурах, высокая износостойчивость, высокое сопротивление коррозии, даже при высоких температурах, высокая теплопроводность, устойчивость к агрессивным средам. В данной статье предлагается решение улучшения качества рабочей поверхности изделий из керамики методом магнитно-абразивного полирования (МАП). Этот метод является одним из самых перспективных в области полирования [1, 2]. Сущность метода: магнитно-абразивный порошок располагается между полюсами электромагнитов, создавая режущий инструмент в виде своеобразной «полирующей щетки». В роли связки абразивных зерен используется магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на единичные зерна. Причем степень упругости этой связки легко регулируется изменением напряженности магнитного поля, обеспечивая различные этапы обработки (черновое, чистовое полирование). При движении заготовки через рабочую зону порошок оказывает давление на деталь в каждой точке поверхности, что приводит к съему металла и сглаживанию микронеровностей. Он обеспечивает получение параметров шероховатости  $Ra=0,01-1$  мкм, снижение волнистости в 8-10 раз, гранности до 2 раз. При этом повышается контактная прочность и износостойкость деталей в 2-3 раза, увеличивается опорная длина профиля до 75-85% [1]. Способ обладает возможностью обрабатывать как мягкие и вязкие, так и неметаллические материалы.

Целью данной работы является исследование формирования микрорельефа поверхностного слоя изделий из керамики при магнитно-абразивной обработке, а также исследование влияния режимов резания на параметры шероховатости.

**Основная часть**

При магнитно-абразивном полировании отверстий затруднено размещение полюсов электромагнитных индукторов в отверстиях и создание там сильных магнитных полей. Малые градиенты магнитной индукции на границах образующихся внутри отверстий рабочих зазоров являются причиной пониженной производительности.

На кафедре металлорежущих станков и инструментов ДонНТУ разработано устройство для экспериментальных исследований МАО внутренних поверхностей на базе токарно-револьверного станка 1341, показанное на рис. 1. Предоставленная схема обработки представляет собой вращение магнитно-абразивного порошка внутри отверстий наведенным извне магнитным полем. Обрабатываемый образец представляет собой втулку, изготовленную из  $Al_2O_3$ , с внутренним отверстием диаметром 28 мм. Втулки предварительно обрабатывались с помощью алмазного шлифовального круга 1A1 20x10x10 AC4 250/200 - 4 - M2-01 и 1A1 10x10x6 AC4 100/80 - 4 - B2-01 ГОСТ 16167-90, что помогало обеспечить необходимую исходную шероховатость по параметру  $Ra$  0,5 и 0,25 мкм, а также требуемую геометрическую точность отверстия.



Рис. 1. Устройство для экспериментальных исследований МАО внутренних поверхностей на базе токарно-револьверного станка 1341

Четыре магнитных неодимовых кольца, установленные на оправке полировального шпинделя, расположены по отношению друг к другу противоположной полярностью и обеспечивают суммарную магнитную индукцию 0,8 Тл. Между магнитами установлены стальные кольца, которые пропускают через себя магнитный поток, создаваемый двумя соседними магнитами. В качестве магнитно-абразивного порошка использовали железно-абразивный порошок с синтетическим алмазом в виде абразивных включений производства НТЦ ВИИ «Электрон» г. Донецк. Размер фракции порошка 180/100, размер абразива 7/5, содержание абразива в зерне 40%. Станок работает следующим образом. В зажимное устройство (патрон) устанавливается заготовка. На полировальную оправку наносится абразивный порошок. Затем приводится в движение шпиндель вращающее зажимное устройство с установленной туда заготовкой и полировальный шпиндельный узел. Зазор между оправкой и заготовкой устанавливался равным 1,5 мм, в пределах которого может содержаться не менее 4-х слоев магнитного абразивного материала и достигается наименьшее значение установившейся шероховатости.

Вращение оправки осуществляется от регулируемого двигателя постоянного тока с частотой от 1000 до 2500 об/мин, обеспечивая скорость резания микропорошком  $V_p$ . Кроме этого при МАП оправке сообщается постоянное возвратно-поступательное движение относительно заготовки, которая вращается с частотой  $n$  и обеспечивает скорость заготовки.



Изменение параметра микронеровности  $Ra$  обработанных отверстий втулки от времени полирования  $\tau$ , как показали экспериментальные исследования, описывается экспоненциальной зависимостью следующего вида

$$Ra = a \cdot \exp(-b \cdot \tau) + ab, \quad (1)$$

где  $b$  – коэффициент, который характеризует установившееся значение  $Ra$  изделия после МАО;  $a$  – коэффициент, который характеризует величину уменьшения параметра  $Ra$  при МАО по отношению к исходной шероховатости.

Как видно из рисунка 2, характер изменения высотного параметра микрорельефа  $Ra$  от времени обработки для МАО при разной частоте вращения заготовки и при постоянных значениях величины зазора и исходного значения высотного параметра носит экспоненциальный характер в соответствии с зависимостью 1. Изменение шероховатости поверхности отверстия втулки происходит в течение первых пяти минут работы.

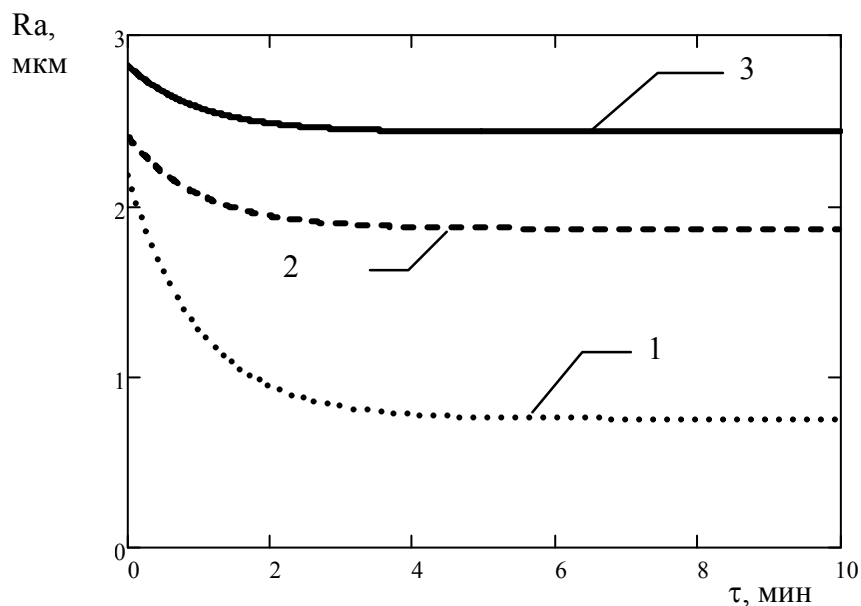


Рис. 2. Влияние времени полирования на параметр микрорельефа  $Ra$  при различных значениях частоты вращения заготовки: 1 – 100 об/мин; 2 – 150 об/мин; 3 – 245 об/мин

Изменение установившегося значения параметра  $Ra$  от частоты вращения заготовки носит нелинейный характер, который может быть описан функцией следующего вида

$$Ra(n) = 5 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 - 8 \cdot 10^{-3} \cdot n + 1$$

Зависимость установившегося значения параметра  $Ra$  от частоты вращения заготовки  $n$ , приведена на рис. 3. Таким образом, существуют рациональные значения частоты вращения заготовки (50...100 об/мин), при которых обеспечиваются наименьшие значения установившейся величины  $Ra$ .

На основании результатов проведенных исследований было спроектировано устройство для обработки волокна и выбраны режимы ее МАО (исходное значение  $Ra = 0,27$  мкм;  $\delta = 1,5$  мм;  $V_p = 4$  м/с;  $n = 80$  об/мин).



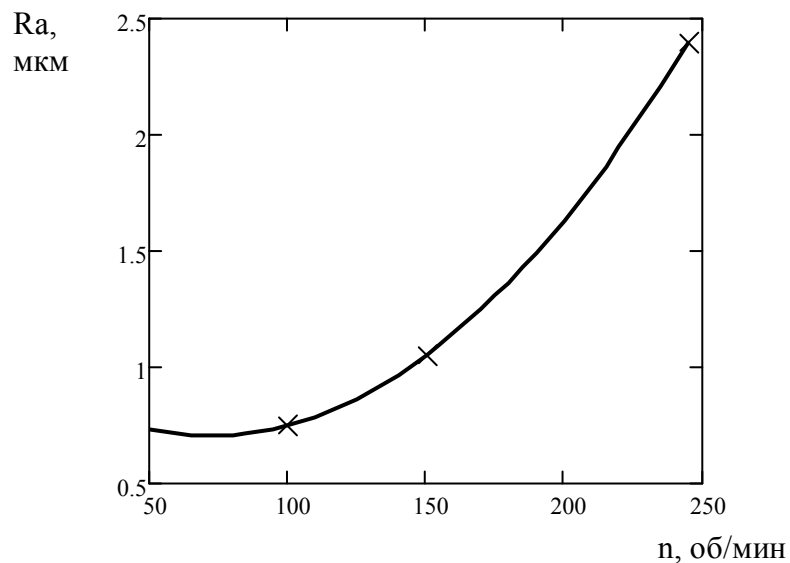


Рис. 3. Влияние частоты вращения заготовки при МАП на установившееся значение параметра микрорельефа  $Ra$

### Выводы

При внутреннем магнитно-абразивном обработке с зазорами и постоянными магнитами в течение времени 5 мин устанавливается шероховатость, значение которой определяется исходным значением микронеровностей и величиной магнитного поля.

При магнитно-абразивном полировании существуют рациональные условия обработки, определяемые режимами резания (скоростью инструмента, частотой вращения заготовки) и величиной зазора 1,5 мм между постоянным магнитом и обрабатываемой заготовкой.

**Список литературы.** 1. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов.— Л.: Машиностроение. Л. 1986. - 176 с; 2. Сакулевич Ф.Ю. и др. - Магнитно-абразивная обработка точных деталей. - Мн.: "Высш. школа", 1977. -288 с. 3. Скворчевский Н. Я., Федорович Э. Н., Ящерицын П. И. Эффективность магнитно-абразивной обработки.— Мн.: Наука і техника, 1991.-215 с. 4. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная обработка. Сущность, классификация и кинематика процессов МАО.— Машиностроение, Л., 1986- 176с.

**УМЕНЬШЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ  
КОМПРЕССОРА ЗА СЧЁТ ВНЕДРЕНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ  
ОБРАБОТКИ****Толкач В.В., Медведев В.В.** (*кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина*)*vadim.medvedev@ua.fm*

**Введение.** В конструкции компрессоров имеются болты, стягивающие цилиндры. Данные детали выдерживают постоянные импульсные нагрузки растяжения. Для увеличения их долговечности в технологии применяется сложный процесс двукратной закалки. В тоже время незначительная стоимость и высокая производительность устройств и современных установок, применяемых в промышленности, а также простота технологии МИО позволяют рекомендовать ее для производства компрессоров. Внедрение МИО позволит уменьшить остаточные и усталостные напряжения в деталях и конструкциях, повысить стойкость режущего инструмента из слабомагнитных материалов, например инструмента, оснащенного пластинами из твердых сплавов типа ВК, ТК и ТКК.

**Физическая сущность обработки.** При магнитном воздействии вещество изменяет свои физические и механические свойства. Улучшение свойств у ферромагнитных деталей, прошедших МИО, достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала. [1,2]

Согласно магнитно-импульсная обработка (МИО) представляет собой комплексное воздействие на материал магнитострикционных процессов и механических деформаций, тепловых и электромагнитных вихревых потоков, локализованных в местах концентраций магнитного потока, а также систему процессов, направленно ориентирующих «спин-характеристики» внешних электронов атомов металлов пограничной зоны контакта зерен (перегруженного участка кристаллита). Суть этой теории заключается в следующем: при перемещении детали в полости соленоида вследствие неоднородной кристаллической структуры в ней возникают вихревые токи, которые обуславливают магнитное поле и локальные микровихри. Они, в свою очередь, нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла. Градиент теплового потока при магнитно-импульсной обработке тем выше, чем менее однородна микроструктура металла. В местах концентрации остаточных или усталостных напряжений, связанных с технологией производства обработки или эксплуатации детали, теплота, наведенная при магнитно-импульсной обработке вихревыми токами, частично уменьшает избыточную энергию составляющих кристаллитов и зерен структуры образца особенно в зоне контакта напряженных участков. Кроме того, вихревое магнитное поле обуславливает более равномерное ее охлаждение. Одновременно с тепловыми процессами за счет импульсного магнитного поля в металле происходит полярная ориентация спинов электронов атомов, расположенных в области контакта кристаллитов и зерен сплавов, вследствие чего улучшаются механические свойства материала. При этом деталь в магнитном поле подвергается «винтовому сжатию». Возникающие электродинамические силы частично уплотняют кристаллиты металла, вследствие чего снижаются концентрации напряжений. В стали уменьшается избыточная энергия, снижается концентрация напряжений, вследствие чего улучшаются механические свойства. Например, при взаимодействии трущихся поверхностей в поверхностном слое снижаются растягивающие напряжения, увеличиваются удерживающие сма-

зочный материал напряжения, возрастает дисперсность блоков мозаики поверхностного слоя металла, повышается закрепление в пограничном слое легирующих элементов. При этом повышается теплопроводность материала, увеличивается скорость отвода тепловых потоков при жидкостном охлаждении, возрастает поляризация органических компонентов смазочного материала, увеличивается адгезия смазочного материала на металлической поверхности и ускоряется отвод теплоты из узлов трения.

Применяя МИО, можно значительно уменьшить избыточную энергию материала, связанную с концентрацией внутренних и поверхностных напряжений в конкретной детали, и снизить до минимума вероятность ее поломки. Изменения избыточной энергии поля при МИО стальных деталей (или заготовок) показаны на рис. 1а, точки 1–4. Для каждого материала существует оптимальное значение внешнего импульсного магнитного поля  $H_{опт}$ , при котором концентрация напряжений в материале, а следовательно, и избыточная энергия  $F$  предельно уменьшаются ( $F \rightarrow F_{min}$ ), вследствие чего повышается надежность детали. Вероятность разрушения детали (рис. 1б, точка 5) не превышает 0,25, что гарантирует нормальную работу механизма.

Для уменьшения значения  $F$  в материале конкретной заготовки (инструмента или детали) необходимо затратить некоторое количество электромагнитной энергии  $w_0$ , значение которой зависит от массы  $m$ , объема  $V_m$  и состояния материала  $\psi$  детали. При намагничивании (или повторном намагничивании) в структуре ферромагнитных деталей за счет энергии происходят два процесса: процесс смещения границ доменов, состоящий в росте их объемов, у которых намагниченность ориентирована близко к направлению поля за счет изменения объема соседних доменов, что повышает теплопроводность образцов; процесс изменения направления самопроизвольной намагниченности отдельных доменов и кристаллитов путем поворота вектора намагниченности, вследствие чего повышаются вязкость и износостойкость материала. [1,3]

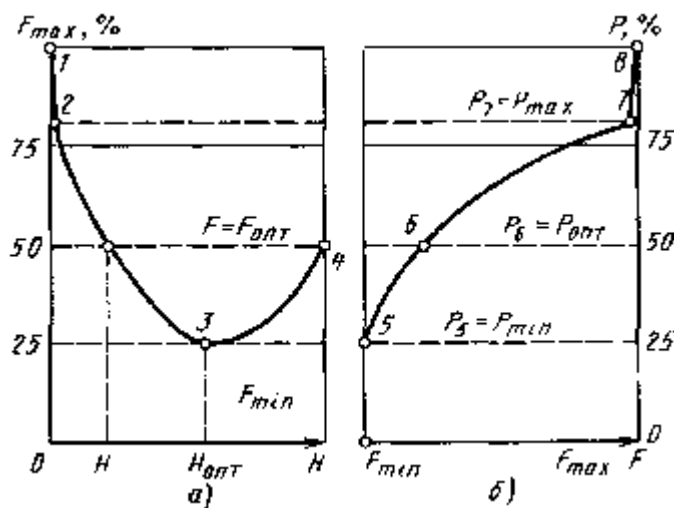


Рис. 1. Изменение избыточной энергии  $F$  в образце из ферромагнитного сплава в зависимости от напряженности поля  $H$  при МИО (а) и влияние  $F$  на вероятность разрушения детали  $P$  (б)

Для каждой стали существует определенная величина напряженности импульсного магнитного поля, а следовательно, и величина магнитной энергии  $W_i$ , которая поглощается материалом в течение времени обработки  $t$  и максимально улучшает его механические и технологические свойства. [1]

Режимы обработки магнитно-импульсным полем по напряженности соответствуют 50–2000 кА/м при длительности импульса 0,1 — 10 с и различным количеством импульсов.

Режущий инструмент обрабатывают как постоянным магнитным полем, так и магнитно-импульсным полем напряженностью 100–2000 кА/м, при длительности импульса 0,1–1,5 с. Время и величина напряженности магнитного поля зависит от материала инструмента и его размеров.

Методы импульсной магнитной обработки следующие:

- обработка без последующего размагничивания;
- многоцикловая обработка (2 — 10 циклов) с выдержкой между циклами 1 — 20 мин.;
- обработка с применением ферромагнитных сердечников и локальных концентраторов магнитного поля;
- обработка в металлических контейнерах или камерах с применением феррожидкости;
- комбинированные методы.

Магнитную и магнитно-импульсную обработку применяют для упрочнения различных деталей, конструкций и сборочных единиц, например: заклепочных, сварных, резьбовых соединений, зубчатых и червячных передач, опорных устройств и муфт, ресор и пружин, стальных канатов и тросов грузоподъемных машин, режущего инструмента и т.д.

**МИО режущего инструмента и деталей машин.** Опыты показали, что при намагничивании необязательно материал детали доводить до насыщения. Для технологических целей достаточно намагнитить до 10 ... 50% магнитного насыщения конкретной стали. Изучение влияния магнитного поля на кривые фазовых переходов при охлаждении стали показало, что при наложении поля переориентация кристаллитов термообработанных образцов ускоряется почти в 2 раза.

Исследования показали, что при импульсном намагничивании лезвийного инструмента из быстрорежущих сталей Р18, Р12, Р6М5 при сверлении, точении и фрезеровании конструкционных сталей коэффициент трения инструмента уменьшается в 1,5...2 раза. Для вращающихся деталей машин из сталей 40Х, 30ХГСА, 3Х13, ХВГ и других при МИО коэффициент трения в рабочих узлах механизмов снижался в 1,2...2,5 раза, при этом в 3...5 раз ускорялась приработка рабочих поверхностей со смазочными пленками в диапазоне температуры 50...300 С. Например, температурная стойкость пленки эмульсола при сверлении стали 40Х сверлом из сплава Р6М5 при МИО инструмента полем напряженностью 350 кА/м возрастала в 2 раза. Для других видов материала получены аналогичные результаты, показанные на рис.2.

Для улучшения механических свойств конструкционных сталей напряженность поля МИО не должна превышать 1000...1500 кА/м. В этом случае ударная вязкость, сопротивление усталости, временное сопротивление на растяжение, предел прочности на изгиб и другие свойства стали возрастают не менее чем на 10...20%. [1]

Обработка статистического материала лабораторных исследований ЭВМ по влиянию МИО на механические и технологические свойства конструкционных, углеродистых и быстрорежущих сталей показала, что МИО повышает также динамическую прочность стали в диапазоне температур 100... 600°С на 10...40 %.

Испытывалось влияние МИО на некоторые физические и механические свойства образцов из твердых сплавов. За счет МИО теплопроводность твердых сплавов повышается не менее чем на 10%, а временное сопротивление на изгиб на 15... 20%, что обу-

способствует снижению выкрашивания зерен из режущей кромки инструмента при резании металлов и сплавов.[1]

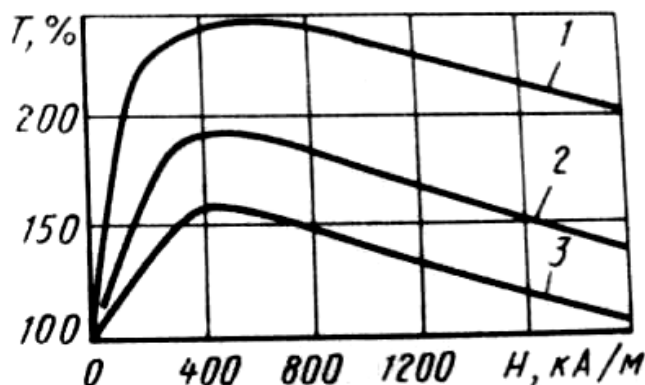


Рис.2. Влияние напряженности магнитного поля с импульсами длительностью 1 с на относительную стойкость сверл диаметром 10,5 мм из сталей: 1 - P18; 2 - P9K5Ф; 3 - P6M5.

Исходя из накопленного опыта предыдущих исследований были обобщены результаты проведения МИО на разных режимах обработки. Общим выводом является то, что достижение эффекта обработки возможно на полях, напряжённостью более 100-150кА/м. Наибольший эффект возникает при напряженности поля 300-600кА/м, как показано на рис.2-3.

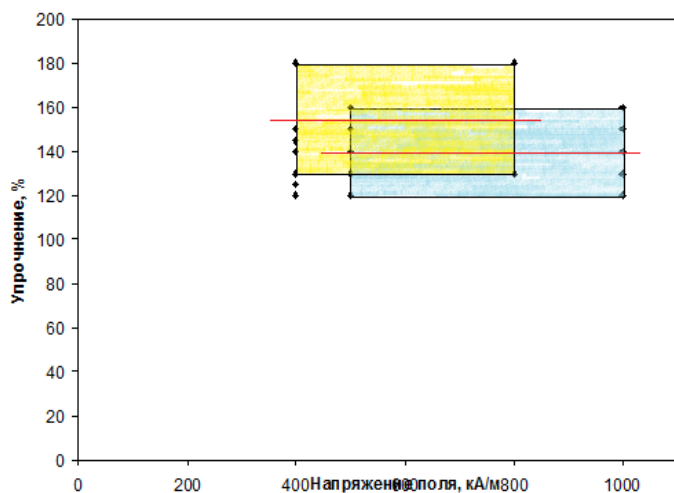


Рис. 3. График зависимости упрочнения стальных деталей от напряженности поля

**Методы проведения МИО.** Деталь перед обработкой (или инструмент) помещают в полость соленоида со стороны, например, северной полярности таким образом, чтобы центр тяжести детали был удален от положения равновесия. При включении установки деталь силой  $F_1$  "втягивается" магнитным полем в полость соленоида с некоторым ускорением и совершает внутри полости колебательные движения. При МИО за счет инерции деталь (и ее центр тяжести) сместится в противоположную сторону и она испытает втягивание в соленоид со стороны южного полюса. Со стороны другого полюса соленоида на деталь действует сила  $F_2$ , которая и втягивает ее обратно внутрь соленоида. Таким образом, деталь (инструмент), многократно пересекая магнитный поток, совершает в полости соленоида свободные перемещения, которые с течением вре-

мени уменьшаются за счет сил трения детали о стенки индуктора и которые будут затухать. Когда колебания прекратятся, деталь займет положение равновесия, а сила  $F_2$  будет равна нулю. При этом деталь расположится по центру соленоида. Количество колебаний и амплитуда их зависят от мощности поля  $W_0$ , массы детали  $m$  и электромагнитных свойств материала  $\psi_m$ . [1]

В качестве оборудования для создания столь высоких магнитных полей возможно применять дефектоскопы магнитные. Данные устройства предназначены для намагничивания деталей с целью выявления внутренних и поверхностных трещин. Импульсы тока, генерируемые такими устройствами достаточны для нужд МИО. Например, дефектоскоп ПМД-70, показанный на рис.4, может развить ток в 1100А на катушке из одного витка.



Рис. 4. Общий вид дефектоскопа ПМД-70

Уменьшив диаметр катушки до размеров винта компрессора, и пересчитав количество витков для сохранения рабочей индуктивности, находим, что с помощью дефектоскопа возможно получения полей, с напряженностью соответствующих возрастающей части графиков рис.2.

**Вывод.** Таким образом, МИО представляет собой комплексное воздействие на материал магнитоstrictionных процессов и механических деформаций, тепловых и электромагнитных вихревых потоков, локализованных в местах концентраций магнитного потока, а также систему процессов, направленно ориентирующих "спин-характеристики" внешних электронов атомов металлов пограничной зоны контакта зерен (перегруженного участка кристаллита). В целом МИО предусматривает сочетание электромагнитного и термодинамического способов управления (в соотношении примерно 1:1) неравновесной структурой вещества. Причем чем больше физических "несовершенств" и технологических "неоднородностей", связанных с процессом изготовления детали (инструмента), тем выше эффективность МИО.

**Список литературы:** 1. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М.: «Машиностроение», 1989. 112 с. 2. Преображенский А.А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. М.: «Машиностроение», 1972. 460 с. 3. Винтер Э.К. Магнитный резонанс в металлах. М.: Мир, 1976. 486 с.