

---

УДК 621.7.015

Марунич В.А. к.т.н., доц., Яриз А.Ю.

Национальная металлургическая академия Украины, г.Днепропетровск, Украина

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

Marunych V., Yariz A.

The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

### A NEW TECHNOLOGY OF TREATMENT OF POLYMERIC MATERIALS CUTTING

---

*В статье разработаны новый метод достижения высокой точности и новый метод технологического достижения качества обработки полимерных покрытий на крупногабаритных нежестких изделиях. Разработаны принципиально новые схемы размерной обработки вязкоупругих полимерных материалов, основанные на использовании физического эффекта скользящего резания, обеспечивающие полное выполнение основных технологических требований к качеству и точности обработанной поверхности. Сформулирована гипотеза о механизме скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов.*

*Ключевые слова: полимерные материалы, новый метод резания, качество поверхности, точность, нежесткие изделия.*

---

#### **Введение**

Непрерывный научно-технический прогресс в различных отраслях промышленности, таких как космическая и ракетная техника, авиа- (самолеты-невидимки), судо-, автомобилестроение и т.д. неразрывно связан с появлением новых полимерных материалов со специфическими вязкоупругими свойствами. К указанным материалам относятся ТПП-ФС (материал на основе хлорсульфированного полиэтилена и наполнителей – полиметилметакрилата, полипропилена, феноло-формальдегидных микросфер, древесной муки), пенополиуретаны (ППУ). Такие материалы применяются в качестве теплоизоляционного (ТИ) и теплозащитного покрытия (ТЗП) на крупногабаритных нежестких оболочках, например, топливных баках ракетной техники.

В этой связи одной из основных задач, стоящих перед наукой и промышленностью, является повышение эффективности производственных процессов за счет создания новых наукоемких технологий, направленных на непрерывное улучшение качества выпускаемой продукции, повышение безопасности работ при одновременном увеличении производительности труда и снижении себестоимости изделий. Все это требует проведения глубоких как теоретических, так и экспериментальных исследований и разработки новых, нетрадиционных методов технологии.

#### **Цель**

Целью данной работы является установление особенностей, закономерностей и зависимостей обработки резанием вязкоупругих полимерных материалов для обеспечения управления процессом отделения срезаемого слоя, на базе которых может быть разработана новая наукоемкая технология обработки резанием вязкоупругих полимерных материалов на крупногабаритных нежестких изделиях (КНИ) с активным контролем толщины теплоизоляционного слоя, что позволит повысить точность толщины покрытия, улучшить качество обработанной поверхности и экологию на производстве, а также достигнуть более высокой производительности по сравнению с существующими методами.

#### **Исследование**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать гипотезу о повышении точности активного контроля при обработке диэлектрических покрытий на металлических изделиях с использованием вихревых токов;
- разработать гипотезу о механизме скользящего резания вязкоупругих полимерных материалов, позволяющую управлять процессом отделения срезаемого слоя;
- установить закономерность и зависимости обеспечения принципа скольжения кромки по поверхности резания от величины параметра  $\lambda$ , что позволит создать условие физического эффекта скользящего резания и разработать новые принципиальные схемы лезвийной обработки;

- схематизировать физическую модель процесса контактного скользящего взаимодействия инструмента с заготовкой из полимерного материала с учетом расширенного диапазона рассматриваемых явлений;
- провести экспериментальные исследования в подтверждение выдвинутых гипотез.

Для обеспечения точности толщины полимерного покрытия, выполняющего теплоизоляционную, теплозащитную или др. функцию, необходимо подобрать оптимальный метод неразрушающего контроля, позволяющий с минимальными погрешностью и затратами обеспечить обработку этих покрытий с высокой точностью.

Анализ известных способов бесконтактного контроля, показал, что наиболее рациональным для нашей технологической задачи обеспечения активного контроля является контроль с применением вихревых токов.

Для достижения максимально возможной точности обработки полимерных покрытий на КНИ с применением активного контроля на базе вихревых токов, выдвигается гипотеза [1], сущность которой заключается в следующем: зону резания располагают над зоной максимальной плотности вихревых токов так, чтобы они были соосны и соразмерны. Это условие позволяет максимально использовать возможности вихретокового способа и свести к минимуму погрешность обработки резанием.

На основании предложенной гипотезы разработан новый метод, основанный на реализации принципа наложения и соразмерности зоны резания и зоны наибольшей плотности вихревых токов в токопроводящем объекте, являющемся подложкой для покрытия, технологической и измерительной базой.

Для подтверждения гипотезы и осуществления разработанного метода, создана специальная техническая система [2]. Особенностью данной системы является то, что датчик перемещения режущего инструмента выполнен в виде кольца, а ножи режущего инструмента расположены в пределах плоскости проекции торцевой части кольца на поверхности, перпендикулярной его оси, при этом корпус режущего инструмента выполнен из неметаллического материала и расположен в середине указанного кольца соосно ему. Для реализации принципа наложения и соразмерности зоны резания и зоны наибольшей плотности вихревых токов в токопроводящем объекте выведена следующая зависимость [3]:

$$D_u = D_q + 1.5 \cdot (h' + a / 2)$$

где:  $D_u$  - диаметр режущего инструмента (например, торцевой фрезы);

$D_q$  - средний диаметр цилиндрического датчика активного контроля;

$h'$  - расстояние от поверхности металла до торца датчика активного контроля;

$a$  - толщина датчика активного контроля.

Однако следует отметить, что далеко не всегда применение традиционных инструментов и схем резания позволяет получить необходимое качество поверхностного слоя вязкоупругих полимерных изоляционных материалов. Традиционная схема предполагает отделение срезаемого слоя в результате создания зоны напряженного состояния, обусловленной упругопластической деформацией. При этом стружка отделяется по плоскостям действия наибольших напряжений.

Для вязкоупругих полимерных материалов такая схема резания приводит к отрыву срезаемого слоя по направлениям разрыва молекулярных связей на определенной стадии упругонапряженного состояния. Обработанная поверхность этих материалов при применении традиционного резания характеризуется неупорядоченными (хаотическими) вырывами и сколами по кромкам, определяющими весьма низкие показатели качества поверхностного слоя. Соответственно получают низкими показатели точности размеров обработанных поверхностей.

Решение данной проблемы мы видим в применении нового метода скользящего резания, позволяющего управлять процессом упругих и пластических деформаций при отделении срезаемого слоя и достигать высокого качества поверхности полимера.

Под скользящим резанием понимается процесс обработки, при котором скольжение режущей кромки, во время рабочего цикла, по обрабатываемой поверхности в направлении главного движения превалирует над ее перемещением в направлении движения подачи.

Новый метод обработки вязкоупругих полимерных материалов [4] основан на использовании схемы резания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, позволяющих реализовать скользящее резание. Процесс скользящего резания вязкоупругих полимерных материалов предполагает существенное уменьшение деформации обрабатываемого материала по сравнению с традиционным резанием и, таким образом, создаются условия, при которых энергия деформации преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей на более ранней стадии.

На основании вышеизложенной гипотезы о механизме скользящего фрезерования провели схематизацию физической модели указанного процесса [5,6].

Структурной основой физической модели процесса скользящего фрезерования полимерного материала, схематизированной на рис. 1, является учет скольжения режущей кромки по поверхности резания, в результате которого упругая энергия преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей.

При скользящем воздействии лезвия инструмента на полимере из-за вязкоупругих свойств обрабатываемого материала, увеличенного рабочего участка лезвия инструмента и уменьшенного кинематического заднего угла формируются увеличенные фактические площадки контакта (I). Они

предопределяют повышенное внешнее трение на задней поверхности лезвия инструмента и соответствующее тепловыделение (III). Однако температура резания невысокая вследствие малого внутреннего трения. В инструменте и полимере возникают циклические механические напряжения (II). В материале они приводят к разрыву химических связей.

Перераспределение сил, характерное для скользящего резания вязкоупругих полимерных материалов, действующих на передней и задней поверхностях лезвия инструмента, соответствующий режим резания и толщина срезаемого слоя, а также новые геометрические параметры предопределили тип образующейся стружки (IV). Стружка непрерывная и требуется ее надлом или срезание. Значительное уменьшение зоны упругой деформации и ее величины при скользящем резании определило формирование обработанного поверхностного слоя (V) без вырывов и сколов по кромкам.

Необходимым условием проявления физического эффекта для управления интенсивностью протекающих процессов, происходящих в контактной зоне, является свободное резание и установление угла наклона кромки  $\lambda$  в пределах:  $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$ .

Схему скользящего фрезерования, представленную на рисунке 2, реализуют два автономно работающих ножа [6 – 8].

Один из ножей, названный подрезным, непосредственно осуществляя скользящее резание, контактирует с обработанной поверхностью и решает при этом главную технологическую задачу обеспечения требований к качеству поверхностного слоя материала.

Второй нож, названный отрезным, по существу выполняет вспомогательную функцию, связанную с отделением надрезанного слоя и в принципе может работать как по традиционной, так и по скользящей схеме резания.

Механизм скользящего резания вязкоупругих полимерных материалов предполагает существенное уменьшение деформации обрабатываемого материала по сравнению с традиционным резанием и, таким образом, создаются условия, при которых энергия деформации преобразовывается в работу разрыва молекулярных связей на более ранней стадии. При этом стружка образуется при свободном резании в результате хрупкого среза и надлома.

Для проведения экспериментальных исследований в подтверждение гипотезы о механизме скользящего резания и гипотезы о повышении точности активного контроля разработана модель режущего инструмента [8].

Исследования проводились методом математического планирования с постановкой полного факторного эксперимента.

Обрабатываемый полимерный теплоизоляционный материал ТТП-ФС и ППУ.

В связи с тем, что вопрос о возникновении вырывов и сколов по кромкам при фрезеровании ТТП-ФС и ППУ практически не изучен, а их образование зависит от целого ряда факторов, то среди специалистов и производителей по обработке ТТП-ФС и ППУ проводилось анкетирование.

В анкете факторы расположены в случайном порядке. Даны также размерности и область варьирования. При этом экспертам было предложено уточнить состав факторов и интервал их изменения.

На основании результатов анкетирования выделили наиболее существенные факторы (табл. 1): X1 – угол наклона кромки  $\lambda$ ; X3 – передний угол  $\gamma$ ; X2 – скорость главного движения резания V; X5 – скорость движения подачи  $V_s$ .

Фактор X4 отсеяли, так как задний угол  $\alpha$  при постоянном значении угла заострения  $\beta$  становится зависимым от переднего угла  $\gamma$ . По результатам предварительных опытов отсеяли фактор X9 (температура резания близка к окружающей среде).

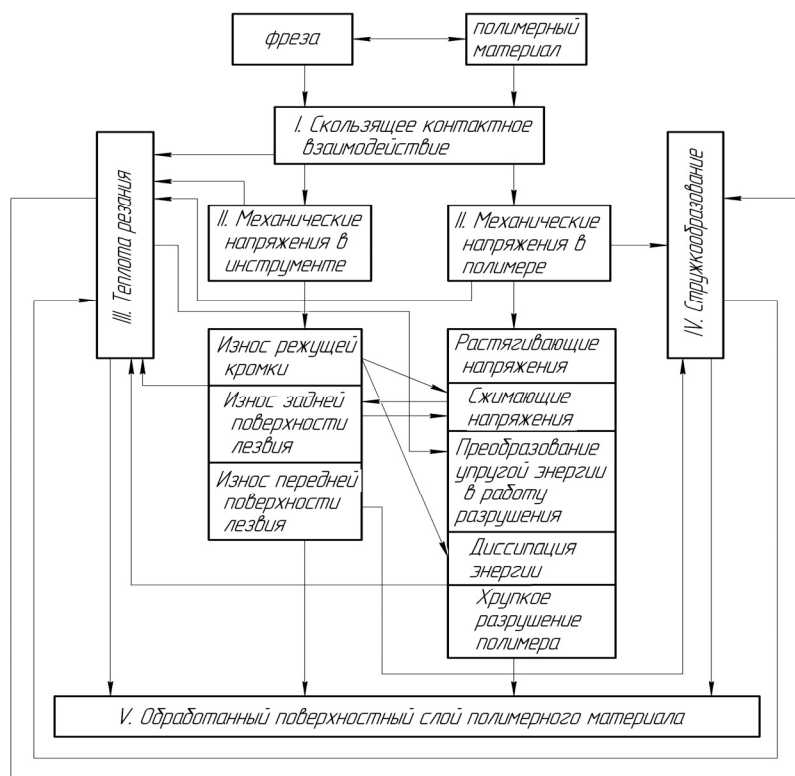


Рис. 1. Схематизация физической модели процесса скользящего фрезерования полимерного материала

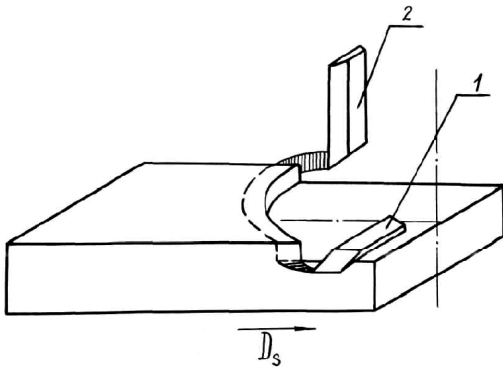


Рис. 2. Схема скользящего фрезерования полимеров в двух взаимно перпендикулярных плоскостях

Остальные факторы в данном эксперименте приняли с учетом априорной информации по среднему значению в интервале изменения и сохраняли постоянными при проведении всех опытов.

Исследование проводилось в соответствии с планом эксперимента, где количество опытов  $N$  определяли по формуле  $N=2^k$ , при варьировании факторов на двух уровнях.

По результатам экспериментальных исследований определены рациональные зоны угловых параметров торцовых фрез:

- угол наклона кромки,  $\lambda - 75^\circ \dots 85^\circ$ ;
- передний угол,  $\gamma - 68^\circ \dots 75^\circ$ ;
- задний угол,  $\alpha - 5^\circ \dots 12^\circ$ .

Что касается рациональных зон параметров режима резания, то нижним пределом, при необходимости, можно считать следующие значения: скорость главного движения резания  $V=2,6$  м/с; скорость движения подачи  $V_s=200$  мм/мин.

Установлен верхний предел рациональной зоны для скорости главного движения резания  $V=20$  м/с. Дальнейшее увеличение скорости главного движения резания приводит к интенсивному повышению концентрации мелкодисперсной пожаровзрывоопасной пыли ТТП-ФС и ППУ в зоне резания.

С целью подтверждения гипотезы об эффективности скользящего резания были проведены экспериментальные исследования при обработке ППУ в Институте технической механики Академии наук Украины.

Таблица 1

#### Результаты априорного ранжирования

Независимая переменная	Кодированное обозначение	Нулевой уровень	Уровень варьирования	
			нижний (-)	верхний (+)
Угол наклона кромки, $\lambda$ , град	X1	75	65	85
Передний угол, $\gamma$ , град	X2	68	61	75
Скорость главного движения резания, $V$ , м/с	X3	2,6	1	4,2
Скорость движения подачи $V_s$ , мм/мин	X4	200	100	315

Исследования проводились для двух схем обработки: скользящего резания торцовым режущим инструментом ( $\lambda=80^\circ$ ) и по традиционной схеме обработки ( $\lambda=15^\circ$ ) с постоянными геометрическими параметрами лезвия и режимом резания, численные значения которых представлены в таблице 2.

Таблица 2

#### Геометрические параметры лезвия и режим резания ППУ

$\gamma$ , град	$\alpha$ , град	$V$ , м/с	$S$ , мм/мин	$t$ , мм
75	5	2,6	200	2

В процессе обработки по традиционной схеме резания происходил отрыв надрезанной части. На рис. 3 хорошо просматривается искажение масштабной сетки, что свидетельствует о больших деформациях, сопровождающих процесс резания. Кроме того, наблюдается восстановление подрезцового слоя. Обработанная поверхность содержит большое количество вырывов и сколов.

Наибольший объем деформации имеет место в отделяемом элементе стружки. Здесь происходит искажение как формы, так и размеров первоначально нанесенной сетки. По высоте сетка изменяется очень незначительно. Главные изменения приходятся на ширину сетки, размер которой уменьшается до 25...30%.

В зоне резания, впереди кромки, также наблюдается некоторое изменение формы и размеров. Величина восстановления подрезцового слоя составляет около 0,3...0,5 мм.

Анализ результатов обработки при скользящем резании (рис. 4) показал, что первой отличительной особенностью образования стружки при такой схеме резания является то, что существенно увеличивается длина отделяемого элемента, стружка сходит непрерывно и напоминает сливную. Образование стружки происходит на пути до 40 мм и более, после чего элемент отделяется. При этом её надлом происходит за режущей кромкой.

Второй отличительной особенностью указанного процесса стружкообразования является то, что он протекает без видимого искажения масштабной сетки, а восстановление подрезцового слоя в 3...4 раза меньше, чем в первой серии опытов.

Следует отметить, что на обработанной поверхности образца ППУ отсутствовали вырывы и сколы по кромкам.

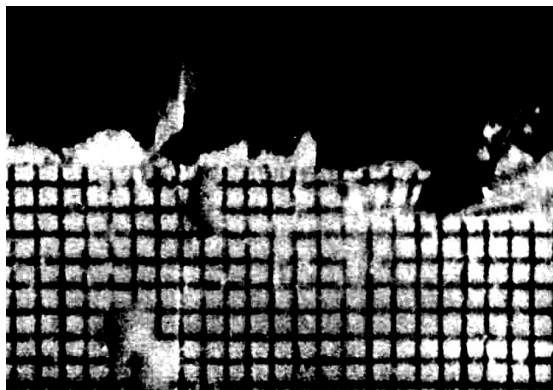


Рис. 3. Увеличенный кадр кинограммы процесса резания торцовым режущим инструментом с углом наклона режущей кромки  $\lambda = 15^\circ$

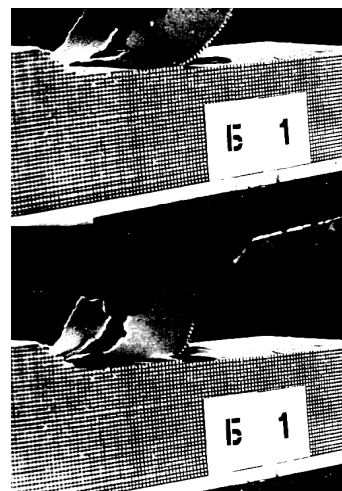


Рис. 4. Формирование поверхностного слоя пенопласта при скользящем резании

Для подтверждения гипотезы о повышении точности обработки с активным контролем толщины изоляции (АКТИ) и осуществления разработанного метода, создана специальная техническая система [1], позволяющая осуществлять настройку таким образом, чтобы диаметр режущего инструмента (торцевой фрезы) совпадал с диаметром наибольшей плотности вихревых токов.

Оценку результирующей технологической погрешности определяли опытно-статистическим методом на основе большой выборки. Измерение действительного размера толщины покрытия проводили прибором ИТН-78 с точностью 3%.

Задача исследования заключалась в определении результирующей технологической погрешности, что позволило установить основную характеристику эффективности обеспечения точности в процессе обработки покрытия ТТП-ФС и ППУ. Этой характеристикой является коэффициент точности  $K_t$ . Учитывая, что допуск на толщину покрытия в соответствии с требованиями КД равен  $T_h = 1,2$  мм, то коэффициент точности  $K_t$  торцевого фрезерования с АКТИ в результате расчетов составил  $K_t = 2,003$ .

### Выводы

1. Впервые разработаны новые методы технологии обработки вязкоупругих полимерных материалов на КНИ, позволяющие повысить точность толщины покрытия и качество поверхностного слоя;
2. Определена зависимость диаметра режущего инструмента от параметров датчика активного контроля, позволяющая обеспечить максимальную точность толщины изоляции при механической обработке с активным контролем на базе вихревых токов;
3. Сформулирована гипотеза о механизме скользящего фрезерования вязкоупругих полимерных материалов и разработаны основные закономерности формирования параметров элементов срезаемого слоя и обработанного поверхностного слоя.
4. Гипотезы о механизме скользящего резания и о повышении точности активного контроля при обработке диэлектрических полимерных материалов на металлических изделиях с использованием вихревых токов нашли экспериментальное подтверждение.
5. Разработана схематизированная физическая модель скользящего фрезерования полимерных материалов, которая устанавливает главные связи и последовательность процессов и явлений, сопровождающих обработку резанием вязкоупругих полимерных материалов.
6. Разработаны принципиально новые схемы размерной обработки вязкоупругих полимерных материалов, основанные на использовании физического эффекта скользящего резания, обеспечивающие полное выполнение основных технологических требований к качеству и точности обработанной поверхности.

**Анотація.** В статті розроблено новий метод досягнення високої точності та новий метод технологічного досягнення якості обробки полімерних покриттів на великогабаритних нежорстких виробах. Розроблені принципово нові схеми розмірної обробки в'язкопружних полімерних матеріалів, ґрунтовані на використанні фізичного ефекту ковзного різання, що забезпечує повне виконання основних технологічних вимог до якості та точності обробленої поверхні. Сформульована гіпотеза про механізм ковзного фрезерування в'язкопружних полімерних матеріалів.

**Ключові слова:** полімерні матеріали, новий метод різання, якість поверхні, точність, нежорсткі вироби.

**Abstract.** In this article considered and decided problem of machining of polymeric materials on non-rigid large-dimensioned constructions for achievement of maximal exactness, quality and productivity.

The purpose of this work is establishment of features, conformities to law and dependences of cutting of viscoelastic polymeric materials on large-dimensioned non-rigid materials for the increase of exactness of coating thickness, improvement of quality of the machined surface and ecology on a production, and also achievements of more high yield as compared to existent methods.

For this purpose developed hypothesis about the increase of exactness of active control at machining of dielectric coverages on hardwares with the use of vortical currents and hypothesis about the mechanism of the sliding cutting of viscoelastic polymeric materials, allowing to manage the process of separation of the cut away layer. The on principle new charts of size machining of viscoelastic polymeric materials, based on the use of physical effect of the sliding cutting, providing complete implementation of the basic technological requirements to quality and exactness of the treated surface, are developed.

The new method of machining of viscoelastic polymeric materials is based on the use of cutting chart in two mutually perpendicular directions, allowing to realize the sliding cutting. It will allow substantially to decrease deformation of the processed material as compared to the traditional cutting and, thus, create terms at which energy of deformation will be transformed in work of break of molecular connections on more early stage.

**Keywords:** polymeric materials, new cutting method, surface quality, exactness, non-rigid constructions.

1. В.А. Маруніч. Новый метод повышения точности обработки крупногабаритных нежестких изделий с применением активного контроля / В.А. Маруніч, А.Ю. Яриз // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – Вып.40. – С.137-142.
2. Пат. 23701 України, МПК В29С 37/00; Пристрій для обробки діелектричних покриттів металевих виробів / В.О. Маруніч, Г.Ю. Яриз / Заявл. 27.11.2006; Опубл. 11.06.2007, Бюл. №8. – 2с.: іл.
3. Пат. 86494 України, МПК В29С 37/00; Спосіб обробки діелектричних покриттів металевих виробів / В.О. Маруніч, Г.Ю. Яриз / Заявл. 16.07.2007; Опубл. 27.04.2009, Бюл. №8. – 3с.: іл.
4. Пат. 2031790 России, МКИ В29 37/00 Способ обработки материалов резанием / В.А. Маруніч / Заявл. 24.11.1989; Опубл. 27.03.1995, Бюл. №9. – 5с.: ил.
5. В.А. Маруніч. Исследование влияния скользящего резания полимерных материалов на качество поверхностного слоя / В.А. Маруніч, А.Ю. Яриз // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 2(73). – Днепропетровск, 2011. – С.44-49.
6. В.А. Маруніч. Особенности обработки резанием полимерных материалов. / В.А. Маруніч, А.Ю. Яриз. // Вісник НТУ «КПІ», 2008. Серія «Машинобудування». Вып.55. – С.215-222.
7. В.А. Маруніч. Новый метод повышения качества поверхностного слоя полимерных теплоизоляционных материалов / В.А. Маруніч, А.Ю. Яриз // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Вып.41. – С.209-216.
8. В.А. Маруніч. Новые подходы к обработке полимеров резанием / В.А. Маруніч, А.Ю. Яриз // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып.75. – С.234-242.

## REFERENCES

1. Marunich V.A., Yariz A.Yu. Noviy metod povysheniya tochnosti obrabotki krupnogabaritnyh nezhestkih szdeliy s primeneniem aktivnogo kontrolya. Mezhdunarodniy sbornik nauchnyh trudov "Progressivnyye tehnologii i sistemy mashinostroeniya" (The new method of improve the accuracy of processing large nonrigid products with using of active control. International collection of scientific labours "Progressive technologies and systems of engineer"). Donetsk, DonNTU. 2010, issue 40. pp.137-142.
2. Marunich V.O., Yariz A.Yu.. Prysriy dl'a obrobky dielectrychnyh pokryttiv metalovyh vyrobiv [A Device For Machining Of Dielectric Coverages Of Hardwares] Patent Ukrainy no 23701 A. 11.06.2007.
3. Marunich V.O., Yariz A.Yu.. Sposib obrobky dielectrychnyh pokryttiv metalovyh vyrobiv [A Method Of Machining Of Dielectric Coverages Of Hardwares] Patent Ukrainy no 86494 A. 27.04.2009.
4. Marunich V.A. Sposob obrabotki materialov rezaniem [A Method Of Processing Materials By Cutting] Patent Rossii no 2031790 A. 27.03.1995.
5. Marunich V.A., Yariz A.Yu. Issledovanie vliyaniya skol'z'yashego rezaniya polimernykh materialov na kachestvo poverhnostnogo sloya. Sistemnyye tehnologii: Regional'ny mezhvuzovskiy sbornik nauchnyh trudov (An Investigation Of Influence Sliding Cutting Of Polymeric Materials On The Quality Of The Surface Layers. System technologies: Regional intercollege collection of scientific labours ) – Dnepropetrovsk, 2011, issue 2(73). pp.44-49.
6. Marunich V.A., Yariz A.Yu. Osobennosti obrabotki rezaniem polimernykh materialov: Visnyk NTU "KPU" seriya "Mashinostroeniye" (Features of machining cutting of polymeric materials: Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI»). Kyiv, 2008, issue 55. pp.215-222.
7. Marunich V.A., Yariz A.Yu. Noviy metod povysheniya kachestva poverhnostnogo sloya polimernykh teploizol'atsionnykh materialov. Mezhdunarodniy sbornik nauchnyh trudov "Progressivnyye tehnologii i sistemy mashinostroeniya" (The New Method Of Improving The Quality Surface Layer Of Polymeric Heat-Insulation Materials. International collection of scientific labours "Progressive technologies and systems of engineer"). Donetsk, DonNTU. 2011, issue 41. pp.209-216.
8. Marunich V.A., Yariz A.Yu. Novye podhody k obrabotke polimerov rezaniem. Mezhdunarodniy nauch.-techn. sbornik "Rezanie I instrument v tehnologicheskikh sistemah" (New Going Near Machining Of Polymers Cutting: international scientific and technical collection "Cutting and tools is in the technological systems"). Charkiv, 2008. issue 75. pp.234-242.