

УДК 620.179

В.А. Марунич, А.Ю. Яриз

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ С АКТИВНЫМ КОНТРОЛЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Введение

В современном машиностроении нежесткие изделия, в том числе и крупногабаритные (корпуса двигательных установок, топливных систем, крупногабаритные емкости различного назначения, изделия судостроения), представляют сложность с позиции обеспечения точности обработки.

Особенностью вышеуказанных изделий является низкая пространственная жесткость.

В процессе механической обработки на точность влияет ряд технологических факторов, каждый из которых вызывает образование характерных первичных погрешностей. В сумме они составляют общую погрешность обработки [1].

При обработке заготовок на предварительно настроенном станке, суммарная погрешность механической обработки определяется из выражения [1]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\delta\ddot{a}}^2 + \Delta_{\delta\ddot{n}\delta}^2 + \Delta_i^2 + 3 \cdot \Delta_{\dot{\epsilon}}^2 + 3 \cdot \Delta_{\Theta}^2 + \Sigma\Delta_{\delta}} \quad (1)$$

где $\Delta_{\gamma\delta}$ – погрешность от упругих деформаций элементов технологической системы;

$\Delta_{уст}$ – погрешность установки заготовки;

Δ_n – погрешность наладки станка;

Δ_u – погрешность, вызванная износом режущего инструмента;

Δ_{θ} – погрешность от воздействий температурных деформаций;

Δ_{ϕ} – сумма погрешностей формы, вызываемых геометрическими неточностями станка и деформациями заготовки.

Для нежестких изделий наибольшую погрешность обработки вызывает погрешность деформации самой заготовки в процессе резания. Не смотря на то, что силы резания при обработке

большинства полимерных материалов незначительны, обеспечить необходимую точность вышеуказанных изделий ввиду их низкой пространственной жесткости и влияния большого числа факторов методом предварительной настройки оборудования не представляется возможным. Вследствие этого, невозможно предварительно рассчитать величину суммарной погрешности обработки.

Постановка проблемы

С учетом вышеупомянутого, при обработке резанием полимерных покрытий, нанесенных на металлические изделия, возникает сложная технологическая задача обеспечения требуемой точности толщины покрытия. Таким образом, появилась необходимость обеспечения высокой точности и производительности лезвийной обработки полимерных покрытий на нежестких изделиях, в том числе и крупногабаритных, что в свою очередь только усложняет задачу из-за больших габаритных размеров и малой жесткости. Для решения поставленной задачи необходимо:

1. Разработать новую технологию, включающую активный неразрушающий контроль толщины покрытия при обработке резанием.
2. Установить зависимость обеспечения высокой точности обработки на основе особенностей неразрушающего способа контроля.

Проведение исследований

Одним из путей повышения точности технологических процессов механической обработки является использование активного контроля или автоматизированных систем управления точностью обработки (АСУТО). Управление процессом в подобных системах осуществляется на основе полученной от него информации. Как известно, те системы, в которых информация о ходе технологического процесса формируется на основе размерного контроля параметра и поступает в управляющее устройство непрерывно, как в период цикла обработки, так и после его завершения, называют системами активного контроля.

Полученная информация о величине и направлении изменения размеров позволяет оптимизировать процесс обработки и обеспечить заданный уровень точности изготавливаемых деталей [2].

Для обеспечения точности толщины диэлектрического 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.

Проведен анализ в смежных областях знаний по бесконтактному контролю толщины диэлектрического покрытия. Были рассмотрены способы, наиболее эффективные с позиции применения активного контроля в процессе обработки резанием.

Анализ известных способов бесконтактного контроля, приведенных в работе [3], таких как визуально-оптический, капиллярная дефектоскопия, магнитный способ контроля, способ контроля вихревыми токами, акустический способ контроля и контроль просвечиванием, показал, что наиболее рациональные для нашей технологической задачи обеспечения активного контроля являются: **магнитный способ контроля, акустический способ контроля и контроль способом вихревых токов.**

Для измерения толщины диэлектрического покрытия на металлических изделиях применяется **магнитный способ контроля**, принцип действия которого основан на регистрации изменений магнитного сопротивления до контролируемого участка, вызванных вариацией расстояния между датчиком и поверхностью изделия. Точность измерения толщины покрытий зависит от различных технологических и конструктивных факторов: кривизны и неплоскостности контролируемой поверхности, шероховатости поверхности, толщины, состояния и свойств материала основы и т.д. Практически данный способ может обеспечить точность в пределах $\pm 10\%$ от верхнего предела шкалы толщиномера. При этом шероховатость поверхности металлического изделия должна быть в пределах $R_z = 80$ мкм. Существенным недостатком, ограничивающим технологические возможности такого способа контроля, является то, что максимальная контролируемая толщина покрытия - 3 мм, а для достаточной точности контроля необходима низкая шероховатость металлического изделия.

Рассмотрим **акустический способ контроля**. Измерение толщины покрытий металлов ультразвуковым способом основано на различии в

поглощении ультразвуковых колебаний покрытием и основой. Ультразвуковой метод измерения толщины диэлектрических покрытий отличается высокой производительностью, достаточной для практики точностью (средняя погрешность измерения составляет 8-10%) и позволяет проводить контрольные операции без нарушения сплошности слоёв и покрытий. Однако данный способ контроля не представляется возможным использовать в качестве активного контроля в виду наличия мертвой зоны, которая ограничивает возможность контроля толщины покрытия в пределах 2,5мм.

Среди всех рассмотренных способов неразрушающего контроля наиболее рациональным, на наш взгляд, является вихретоковый способ.

Контроль способом **вихревых токов** основан на регистрации изменения электромагнитного поля возбуждающей катушки под действием электромагнитного поля вихревых токов, наводимых этой катушкой в контролируемом объекте. При контроле способом вихревых токов используют зависимость амплитуды, фазы, траекторий, переходных характеристик и спектра частот токов, возбуждаемых в изделии, от его формы и размеров, физико-механических свойств и сплошности материала, расстояния до датчика, частоты и скорости перемещений, в том числе вибрации.

К числу главных достоинств вихретокового способа следует отнести электрическую природу сигнала, быстроедействие, что позволяет легко автоматизировать контроль; возможность контроля толщины покрытий в пределах от нескольких микрометров до десятков миллиметров; точность измерения для большинства приборов находится в пределах 5 - 10%. Контроль вихревыми токами выполняют без непосредственного контакта преобразователей с объектом. Это позволяет вести контроль при взаимном перемещении преобразователя и объекта с большой скоростью (до 60 м/с) и облегчает тем самым автоматизацию контроля.

На рисунке 1 приведена обобщённая функциональная схема прибора с накладным измерительным преобразователем [4]. Измерительный преобразователь состоит из возбуждающей обмотки, подключённой к генератору переменного тока, и измерительной обмотки, подключённой к блоку измерения. Магнитное поле измерительного преобразователя возбуждает в плоском объекте

контроля концентрические вихревые токи, плотность которых максимальна на поверхности электропроводящего объекта в контуре, диаметр которого близок к диаметру возбуждающей обмотки. Магнитное поле вихревых токов противоположно первичному магнитному полю возбуждающей обмотки, вследствие этого результирующее поле зависит от электромагнитных свойств контролируемого объекта и от расстояния между преобразователем и объектом, поскольку распределение плотности вихревых токов зависит от этих факторов. В измерительной обмотке преобразователя наводится ЭДС, определяемая потокоцеплением. Эта ЭДС служит сигналом, передающим информацию об объекте в блок измерения.

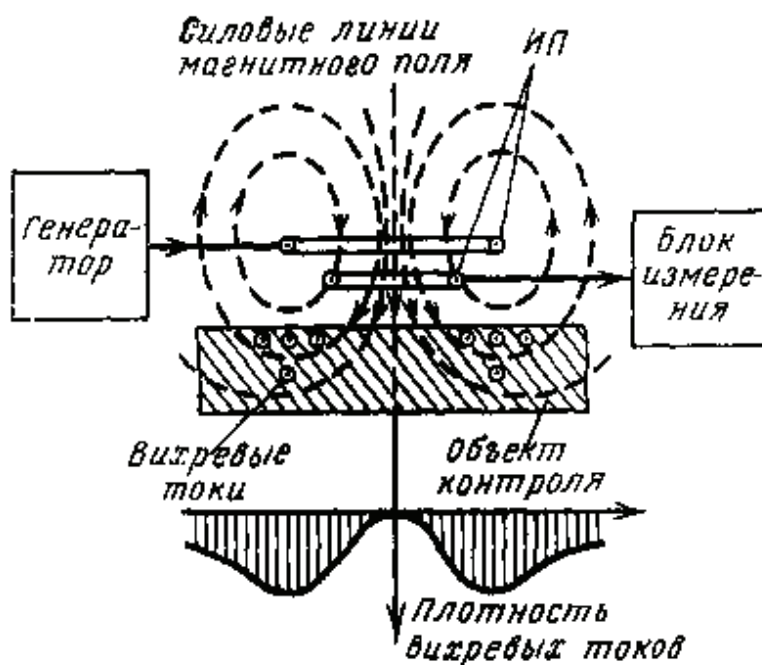


Рисунок 1 - Принцип действия прибора с накладным преобразователем

Следует заметить, что напряжение измерительной обмотки несёт информацию не только об одном параметре объекта контроля. В данном случае это напряжение зависит от толщины покрытия, от удельной электрической проводимости металлической подложки σ , от магнитной проницаемости μ , от состояния поверхности, от наличия и размеров дефектов, от ориентации оси преобразователя и от скорости его движения относительно контролируемого объекта. Таким образом, информация вихретоковых преобразователей имеет многопараметровый характер. Высокая степень информативности вихретоковых преобразователей определяет достоинства и трудности

реализации способа вихревых токов. С одной стороны, способ вихревых токов позволяет осуществлять многопараметровый контроль, с другой стороны, он требует применения специальных приёмов для разделения информации об отдельных параметрах объекта. При контроле толщины покрытия влияние остальных факторов на сигнал преобразователя является мешающим, и это влияние необходимо подавлять.

Другая особенность способа вихревых токов состоит в его бесконтактности. Взаимодействие измерительного преобразователя с объектом происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения измерительного преобразователя относительно объекта. Как правило, при электромагнитном контроле ограничения скорости налагаются не самим методом, а ограниченным быстродействием регистраторов информации или сортирующих устройств. Следствием этого является высокая производительность способа вихревых токов.

Одна из важных особенностей способа вихревых токов состоит в слабой зависимости результатов контроля от параметров окружающей среды. На сигналы вихретокового преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами. Эта особенность вихретокового способа очень важна при обработке резанием диэлектрических покрытий, так как стружка является электростатичной и налипает на систему активного контроля.

Интенсивность и распределение вихревых токов в металле зависят от геометрических размеров датчика активного контроля, электрических и магнитных свойств металла, взаимного расположения преобразователя и обрабатываемого изделия, т.е. от многих параметров.

Конструкция и размеры датчика зависят от формы и размеров изделия и целей контроля. Вихревые токи протекают непосредственно под датчиком, в небольшом объеме изделия [4]. Их амплитуда и фаза различны в каждой точке на поверхности изделия и в глубине (рисунок 2).

Анализ пространственной картины вихревых токов необходим для понимания основ способа и его эффективного практического

использования. Рассмотрим в каждой точке пространства плотность вихревых токов δ и их фазу ψ . Возбуждаемые цилиндрическими датчиками вихревые токи протекают по окружностям, соосным с датчиком. Распределения δ и ψ вихревых токов в пространстве при контроле немагнитных материалов накладными датчиками показаны на рисунке 2.

Координаты ρ и z на рисунке 2 выражены через радиус эквивалентного контура вихревых токов, который равен Rq . Кривые 1 и 2 даны для различных условий возбуждения: 1 - для $\beta_0 = 20$ (β_0 - основной обобщённый параметр при контроле немагнитных материалов), сравнительно большой частоты или электропроводности; 2 - для $\beta_0 = 6$, существенно меньших значений этих величин.

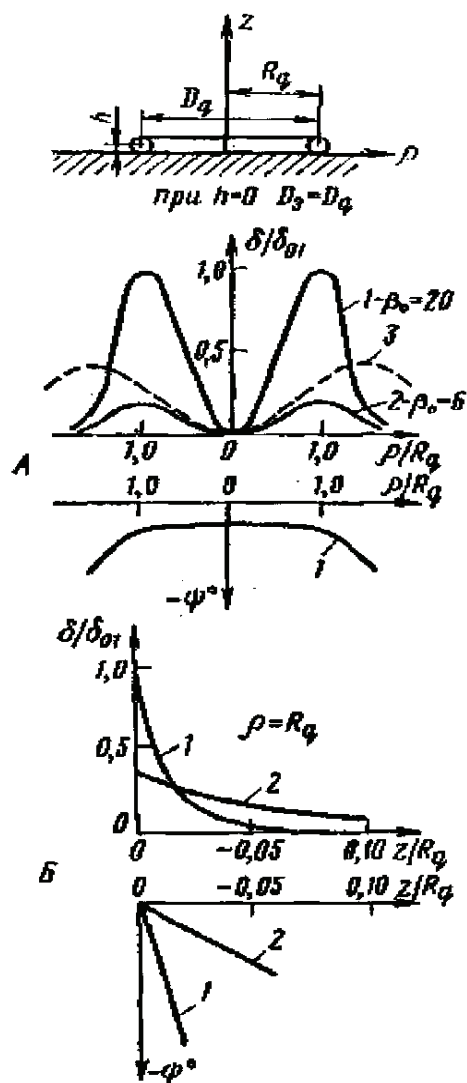


Рисунок 2 - Распределение плотности δ/δ_{01} - и фазы ψ вихревых токов, возбуждаемых витком в плоском изделии: А - по поверхности; Б - по

глубине; 1 - при высокой частоте; 2 - при низкой частоте; 3 - при наличии зазора между витком и изделием в случае высокой частоты

Плотность вихревых токов выражена через максимальное ее значение δ_{01} на поверхности при $\beta_0 = 20$. При контроле накладным датчиком (рисунок 2, А, $\delta/\delta_{01} = \rho/Rq$) на его оси $\delta = 0$. С увеличением ρ увеличивается δ , достигая максимума при $\rho = Rq$ (при $h = 0$).

Удаление датчика от поверхности изделия приводит к уменьшению максимума $\delta(\rho)$ и к увеличению радиуса эквивалентного контура вихревых токов (кривая 3). Фазы токов, находящиеся внутри эквивалентного контура, одинаковы (рисунок 2, А, $\psi = z/Rq$). По мере углубления в металл, увеличении z (рисунок 2, Б), наблюдается резкое уменьшение плотности и запаздывание вихревых токов.

Анализ зависимостей $\delta(z, \rho, \beta_0)$ показывает, что на большей частоте для больших значений электропроводности в поверхностных слоях создаются вихревых токов большей плотности.

Таким образом, изучив принцип действия датчиков активного контроля способом вихревых токов, был сделан вывод, что для контроля толщины диэлектрических покрытий нежестких крупногабаритных изделий оптимальным является кольцевой двухобмоточный накладной датчик с максимальным основным обобщенным параметром β_0 . В то же время, бесконтактность и быстродействие способа вихревых токов позволяют автоматизировать процесс активного контроля, при этом его точность остаётся достаточно высокой.

Для упрощения расчётов каждую обмотку датчика принято заменять эквивалентным витком, а вихревые токи - эквивалентным контуром тока диаметром $D_э$ (рисунок 3). Поскольку для накладного датчика значение диаметра эквивалентного контура вихревых токов $D_э$ зависит от расстояния эквивалентного витка возбуждающей обмотки датчика до изделия h , его вычисляют по формуле [4]:

$$D_э = D_q + 1.5 \cdot h \quad (2)$$

где: $D_э$ - диаметр эквивалентного контура вихревых токов;

D_q - средний диаметр датчика активного контроля;

h - расстояние от поверхности металла до середины датчика активного контроля.

Точность обработки диэлектрических покрытий на нежестких изделиях будет достигать своего максимума в том случае, когда зона

наибольшей плотности вихревых токов будет совпадать с зоной резания. Такое условие достижимо когда диаметр режущего инструмента (например, торцевой фрезы) D_i равен диаметру эквивалентного контура вихревых токов D_ε .

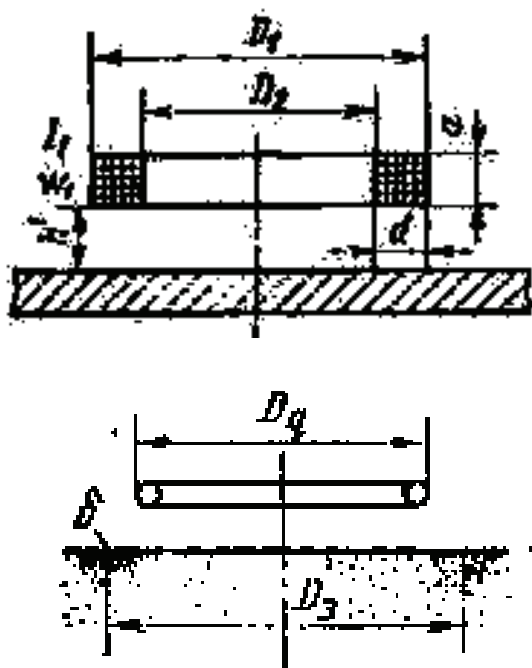


Рисунок 3 - Схемы замены обмоток датчиков эквивалентными витками, вихревых токов - эквивалентным контуром тока

Это условие выражено в зависимости диаметра инструмента D_i от среднего диаметра датчика активного контроля D_q на основании формулы (2) для расчёта эквивалентного контура вихревых токов:

$$D_\varepsilon = D_q + 1.5 \cdot (h' + a/2) \quad (3)$$

где: D_i - 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.

Анализ патентной информации показал, что все существующие на данный момент способы обеспечения требуемой толщины диэлектрического покрытия при его механической обработке, включающие активный контроль, не позволяют получить высокую точность обработанного покрытия на нежестких крупногабаритных изделиях. Это объясняется тем, что в процессе обработки не

учитывается реальное взаимное расположение зоны резания и зоны наибольшей плотности вихревых токов, которые определяют эффективность активного контроля. Таким образом, фактически осуществляется “ложное” слежение за толщиной покрытия.

Для повышения точности обработки резанием диэлектрического покрытия на нежестких крупногабаритных изделиях мы предлагаем применять новый метод обработки диэлектрических покрытий на крупногабаритных нежестких изделиях. Данный метод реализуется посредством устройства для обработки диэлектрических покрытий металлических изделий [5]. Принципиальная схема этого устройства показана на рисунке 4.

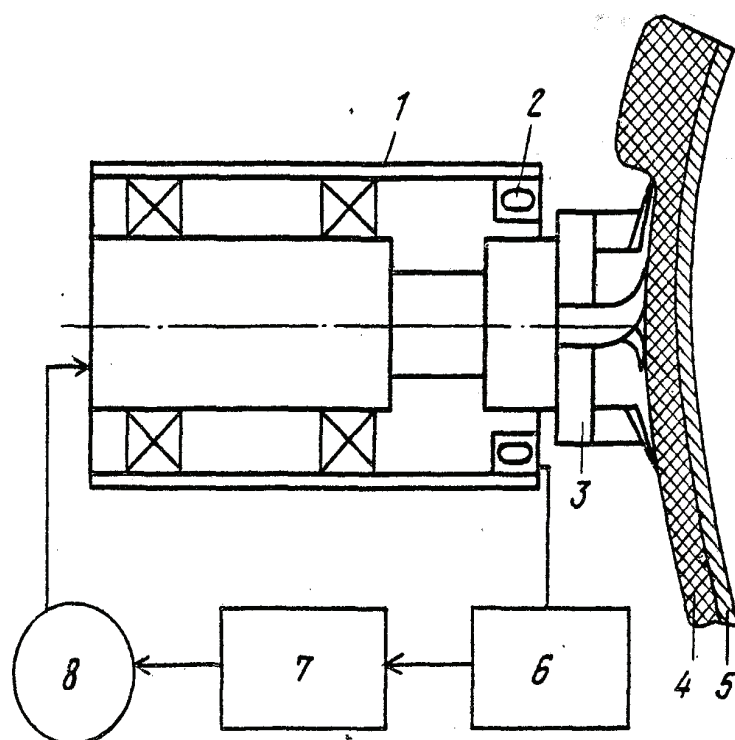


Рисунок 4 - Устройство для обработки диэлектрических покрытий металлических изделий

Устройство для обработки диэлектрических покрытий металлических изделий состоит из режущей головки 1 с кольцевым датчиком 2 и режущего инструмента 3. Кольцевой датчик 2 предназначен для измерения толщины диэлектрического покрытия 4 по отношению к металлической подложке 5 в зоне резания.

Для измерения расстояния от кольцевого датчика 2 до металлического изделия 5 устройство снабжено измерительным блоком 6, блоком управления 7, соединенным с исполнительным механизмом 8 поперечной подачи режущей головки 1.

Исполнительный механизм поперечной подачи 8 подводит или отводит режущую головку 1 от металлического изделия 5. Устройство также содержит механизм продольной подачи и привод вращения режущего инструмента (не показаны).

Метод обработки диэлектрических покрытий на крупногабаритных нежестких изделиях заключается в том, что перед непосредственной механической обработкой вышеуказанное устройство настраивают на заданную толщину таким образом, чтобы диаметр режущего инструмента находился в следующей зависимости от параметров кольцевого датчика вихретокового метода активного контроля:

$$D_{\dot{\epsilon}} = D_q + 1.5 \cdot (h' + a / 2) \quad (3)$$

где: $D_{\dot{\epsilon}}$ - 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.

Настройку осуществляют с помощью эталона толщины покрытия, изготовленного из диэлектрического материала. Затем производится непосредственно механическая обработка.

Режущую головку 1 подводят к обрабатываемому материалу, включают привод вращения режущего инструмента 3 металлического изделия 5 и настраивают кольцевой датчик 2 на заданную толщину покрытия 4, одновременно врезаясь в обрабатываемый материал на соответствующую глубину резания. Потом включают привод вращения металлического изделия 5 и осуществляют обработку. Кольцевой датчик 2 через измерительный блок 6, блок управления 7 и исполнительный механизм поперечной подачи 8 делает стабилизацию режущей головки 1 на заданный размер по отношению к металлическому изделию 5.

Настроенный на заданную толщину диэлектрического покрытия, датчик подает сигнал об изменении расстояния от металла до датчика.

Таким образом, повышение точности обеспечения заданной толщины в процессе обработки диэлектрического покрытия на

нежестких изделиях при использовании вихретокового метода активного контроля достигнуто в результате расположения режущей части фрезы над зоной наибольшей плотности вихревых токов. Для реализации этого условия кольцевой датчик установлен соосно с режущим инструментом, корпус которого выполнен из неметаллического материала, а диаметр фрезы подобран таким образом, чтобы он находился в зависимости от конструкции и расположения датчика активного контроля толщины покрытия согласно формуле (3).

Выводы

1. Разработан новый метод технологии с активным контролем на базе вихретокового неразрушающего способа контроля.
2. Метод позволяет обеспечить высокую точность и производительность обработки резанием диэлектрических покрытий на жестких крупногабаритных быстродвижущихся объектах.
3. Определена зависимость эффективного использования способа от диаметра режущего инструмента и от конструктивных параметров вихретокового датчика активного контроля.
4. Применение предложенного метода позволит получать поверхности сложной формы, в том числе и фасонные с достаточной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Машгиз, 1961. - 380 с.
2. Богуславский Л.А. Достижение требуемой точности обработки средствами активного контроля СТИН № 7, 1997 г. с.14-19.
3. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами/ Герасимов В.Г., Останин Ю.А., Покровский А.Д. и др. – М.: Энергия, 1978. – 216 с., ил.
4. Самойлович Г.С. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник. - М.: Машиностроение, 1976. - 456 с., ил.
5. Патент України 23701. Пристрій для обробки діелектричних покриттів металевих виробів/ В.О. Маруніч, Г.Ю. Ярїз. Бюл.№8-2007.