

Література

1. *Винокуров В.А., Григорьянц А.Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

2. *Гатовский К.М., Кархин В.А.* Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.

3. *Махненко В.И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.

4. *Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М.* Напряжения и деформации при сварке. – К.: Вища шк., 1987. – 246 с.

5. *Прохоренко В.М., Карпенко А.С., Прохоренко Д.В.* Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстродействующим линейным источником // Технологические системы. – 2005. – № 4. – С. 49–55.

УДК 621.923

Усов А.В., Дубров К.А.

Одесский национальный политехнический университет. Украина, г. Одесса

АНАЛИЗ ПРИЧИН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ФЕРРОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ПУТИ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Анотація

У статті досліджено технологічні методи зниження браку у виробництві феррокерамічних деталей, які використовуються у електромеханічному обладнанні. Крім того, розроблено модель, яка дозволяє оптимізувати технологічні параметри шліфування заготовок.

Abstract

Technological means of lowering the flaws percentage while producing ferroceraimical details, used in electromechanical machinery is researched. Besides this, the model that allows the technological parameters optimization of half-finished products sintering was made.

Изделия из феррокерамики в силу широкого диапазона магнитных свойств в большом объеме используются в электроэнергетике – в генераторах, электроприводах, трансформаторах, и др. Благодаря уникальным сочетаниям электромагнитных свойств ферриты находят применение и в других областях техники. Объем их производства в мировом масштабе достиг десятков миллионов тонн в год и продолжает непрерывно увеличиваться. Поэтому весьма актуальным является совершенствование технологических процессов переработки отходов (в том числе и брака) ферритового производства, поскольку доля этих отходов достигает 30%. Переработка отходов в годные полуфабрикаты и изделия не только позволяет экономить сырьевые материалы, энергетические и трудовые ресурсы, но и способствует уменьшению нагрузки на окружающую среду [1].

Технологические потери связаны с потерей сырья, полуфабрикатов и годных изделий в результате несовершенства технологического процесса и технологического оборудования (негерметичность, отсутствие

системы улавливания, частые поломки и т.д.). Брак связан с отклонениями параметров полуфабрикатов и годных изделий выше допустимых значений. В целом брак подразделяется на два вида: устранимый и неустранимый. Переработка устранимого брака в годные полуфабрикаты и изделия обычно требует дополнительных операций, связанных с глубокими физико-химическими превращениями. Для переработки неустранимого брака необходимы дополнительные операции, связанные с измельчением и помолом, термообработкой, активированием путем химического модифицирования поверхности частиц и т.д. Технологические отходы связаны с образованием побочных продуктов на различных технологических операциях (рис. 1) (отходы формовочных масс, отходы шлифования и других видов механической обработки, отходы изделий после различных видов испытаний и т.д.), их также можно подразделить на два вида: утилизируемые в годные полуфабрикаты, утилизируемые в экологически безопасные формы.

Основное внимание исследователей уделялось обеспечению качественных характеристик ферритов на финишных методах [2,3].

В процессе обработки шлифованием феррокерамических изделий характерным видом брака являются дефекты типа трещин, существенно снижающие их эксплуатационные свойства, а зачастую они приводят к последующей переплавке.

Выделяют следующие типы трещин при шлифовании материалов, предрасположенных к такому виду дефектов:

- сетка поверхностных трещин, залегающих на относительно небольшую глубину /до 0,5–1,5 мм/;
- магистральные глубинные трещины / 1–10 мм/;
- подповерхностные замкнутые трещины.

Характер и интенсивность трещинообразования во многом определяется теплофизическими свойствами

обрабатываемых материалов, их структурой, наследственностью предыдущих технологических операций, режимами шлифования, а также характеристиками применяемых кругов. При эксплуатации деталей, поверхностный слой которых содержит шлифовочные трещины, разрушение изделий происходит по местам их скопления.

Шлифовочные дефекты на обработанных поверхностях деталей резко снижают /иногда до 30 раз/ их эксплуатационные показатели и являются недопустимыми.

Поэтому задача определения технологических условий бездефектного шлифования и управления качеством поверхностного слоя изделий, из материалов склонных к трещино- и сколообразованию является весьма актуальной. Это предопределяет необходимость изучения механизма формирования шлифовочных дефектов.

Брак при шлифовании обусловлен образованием сколов, занижением геометрических размеров, а также появлением скрытого брака после спекания (вскрытие трещин). Брак шлифования неисправим и отправляется на переработку вместе с браком спекания.

Особый интерес вызывают современные исследования качественных характеристик рабочих поверхностей феррокерамических изделий при обработке шлифованием.

Качество поверхностного слоя этих изделий формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих финишные операции. Поэтому в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонпряженность алмазно-абразивной обработки. На основании разработанных в [3] моделей температурных полей изучаются закономерности образования дефектов и технологические возможности их устранения в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемых материалов, режимов шлифования, конструкции и характеристик применяемых инструментов.

Однако, имеющиеся в настоящее время модели тепловых процессов алмазно-абразивной обработки получены в предположении однородности шлифуемых материалов и не учитывают наличие дефектов технологической наследственности изделий. Изучению причин

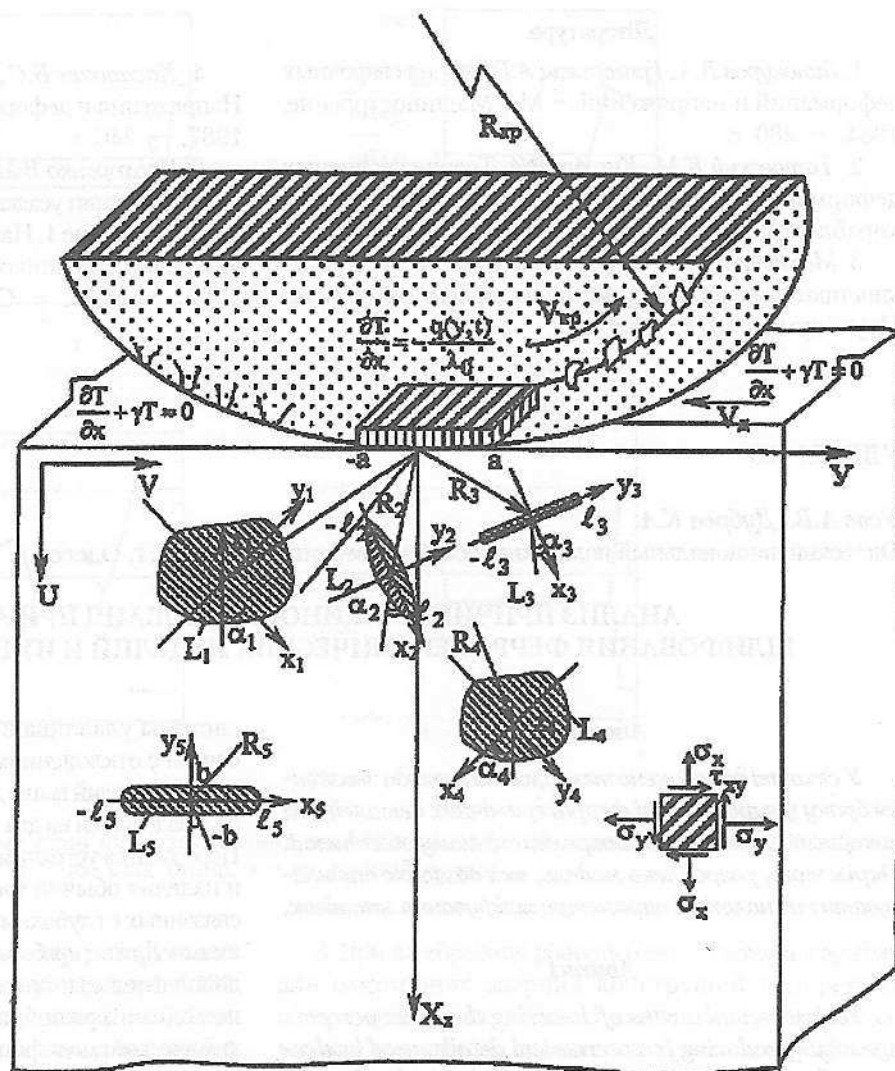


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования термомеханических явлений при шлифовании

образования шлифовочных дефектов-трещин посвящены работы [1, 2, 3], в которых напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали рассматривается, в основном, с качественной стороны или оценивается в каждом отдельном случае экспериментальными методами. Так, предрасположенность магнитных сплавов к трещинообразованию при обработке их шлифованием многие исследователи связывают с особенностями их магнитной и кристаллической структуры, предназначенной для получения высоких магнитных свойств. Отсутствие каких-либо количественных связей трещиностойкости магнитов с другими свойствами не позволяет однозначно пользоваться имеющимися рекомендациями по бездефектной обработке шлифованием.

Для управления качеством детали при шлифовании необходимо изучить закономерности формирования термомеханического состояния поверхностного слоя с учётом его неоднородности. Высокопроизводительное бездефектное шлифование материалов, чувствительных к трещинообразованию, необходимо осуществлять с

учетом наследственных дефектов на предельных режимах, при сохранении равновесного состояния, ещё не вызывающих образование трещин. До настоящего времени не имеется данных для разработки соответствующих рекомендаций.

При постановке задачи о повышении качества шлифования феррокерамических деталей возникает проблема оценки влияния неоднородностей, выбора режимов и характеристик инструмента, смазочно-охлаждающей среды использование которых исключает трещинообразование на обрабатываемых поверхностях. Широкая номенклатура ферритов, подверженных трещинообразованию, многообразие их свойств, размеры, ориентация, размещение и распределение наследственных дефектов способствовали тому, что имеющиеся в настоящее время рекомендации по устранению шлифовочных трещин при обработке поверхностей изделий из них не могут быть общепринятыми. В связи с этим необходимо разработать предпосылки для оптимизации термомеханического состояния поверхностного слоя с учетом его дефектности, исключающие возникновение шлифовочных дефектов типа трещин.

Решение указанных задач позволяет не только изучать прямую технологическую задачу финишной обработки – обеспечение бездефектного шлифования материалов, предрасположенных к трещинообразованию, но и перейти к технологии изготовления материалов “малочувствительных” к указанным дефектам за счет технологической наследственности, формирующей структуру, физико-механических свойств поверхностного слоя, начиная от способов получения заготовок и заканчивая чистовым алмазно-абразивным шлифованием.

При выборе и обосновании математической модели учитывалось, что процесс шлифования деталей сопровождается как тепловыми, так и механическими явлениями. Однако преобладающее воздействие на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя оказывают температурные поля. Учитывая то, что основная масса поверхностного слоя металла при шлифовании находится в упругом состоянии, можно воспользоваться моделью термоупругого тела, отражающей взаимосвязь механических и тепловых явлений при конечных значениях тепловых потоков. Так как для исследований термомеханического состояния шлифуемых поверхностей важной является информация о распространении температур и напряжений по глубине и в направлении движения инструмента, то рассматривается плоская задача.

Анализ масштабных схем взаимодействия круга с обрабатываемой поверхностью показывает, что кривизна круга и детали в пределах зоны контакта несущественно влияет на геометрическую схему взаимодействия круга с деталью. Влияние неоднородностей в виде фазовых превращений неустойчивых структур, межзеренных плёнок, границ кон тура наследственных зёрен, карбидной строчечности, неметаллических включений, раковин, флокенов и др. дефектов, возникающих в поверхностном слое по ходу технологического процесса, учитывается в

модели наличием в поверхностном слое включений и дефектов в виде условных трещин и включений (рис. 1).

Система уравнений, определяющих тепловое и напряженно-деформированное состояние при шлифовании поверхности феррокерамических деталей, верхний слой которых имеет неоднородности типа включений и трещин, содержит:

Уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad 0 \leq x < \infty; \quad -\infty < y < \infty. \quad (1)$$

Уравнение упругости Ламе в перемещениях

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; \quad B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3)$$

где: $T(x, y, \tau)$ – температура в точке с координатами (x, y) и в любой момент времени τ ; a – теплопроводность материала; a_t – температурный коэффициент линейного расширения; μ, G – постоянные Ламе; v, v – компоненты вектора перемещений точки

(x, y) ; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

Начальные условия для данной задачи можно взять в виде:

$$T(x, y, 0) = 0 \quad (4)$$

Граничные условия для температурных и деформационных полей, учитывающие теплообмен с поверхности вне зоны контакта круга с деталью и интенсивного тепловыделения в зоне обработки имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda}, |y| < a^*, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, |y| > a^* \quad (5)$$

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \quad (6)$$

где: $q(y, \tau)$ – интенсивность теплового потока, формирующегося в результате взаимодействия круга с деталью; λ – коэффициент теплопроводности шлифуемого материала; $2a^*$ – длина зоны контакта круга с обрабатываемой поверхностью; γ – коэффициент теплообмена с окружающей средой; σ_x, τ_{xy} – нормальные и касательные напряжения.

Условия сопряжения слоёв:

для температурных полей

$$T^{k-1}(a_k - 0, y, \tau) = T^k(a_k + 0, y, \tau)$$

$$\lambda_{k-q} \frac{\partial T^{k-1}}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T^k}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau)$$

для деформационных полей

$$\begin{aligned} v_j^{k-1}(a_k - 0, y) &= v_j^k(a_k + 0, y) \\ \sigma_x^{k-1}(a_k - 0, y) &= \sigma_x^k(a_k + 0, y), \\ \tau_{xy}^{k-1}(a_k - 0, y) &= \tau_{xy}^k(a_k + 0, y) \end{aligned} \quad (7)$$

где λ_k – теплопроводность k -го слоя; a_k – толщина k -го слоя; v_j – компоненты перемещений в k -ом слое.

Для поверхностных слоёв, имеющих структурные и технологические неоднородности, условия разрывности решения в зависимости от типа дефекта будут:

на включениях

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0$$

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0$$

на трещиноподобных дефектах

$$\langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0 \quad (8)$$

$$\langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$$

где $\langle \bar{v} \rangle, \langle \bar{v} \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$ – скачки компоненты смещений и напряжений.

Предельно равновесное состояние деформируемого поверхностного слоя оценивалось классическими критериями прочности.

Из имеющихся критериев разрушения, учитывающих локальные физико-механические свойства неоднородных материалов, наиболее приемлемыми для данного случая являются критерии силового подхода, связанные с использованием понятия коэффициента интенсивности напряжений /КИН/. Когда нагружение приводит к тому, что интенсивность напряжений K_I становится равной предельному значению K_{Ie} , то трещиноподобный дефект превращается в магистральную трещину.

Моделирование влияния исходной кусочной однородности шлифуемых материалов /деталей с покрытиями/ на термомеханические процессы осуществляется методом разрывных решений. Под ними понимаются такие решения, которые удовлетворяют уравнениям теплопроводности Фурье и упругости Ламе всюду, кроме границ дефектов. При переходе через границу поля смещений и напряжений терпят разрывы I рода, т.е. появляются их скачки $\langle v \rangle, \langle \bar{v} \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$.

Решение тепловой задачи /1/, /4/, /5/, /7/ осуществляется с помощью интегральных преобразований Фурье по переменной y и Лапласа по τ к функции $T(x, y, \tau)$ в I ($k=0$) слое, которые описываются в интегральной форме в виде:

$$T_0(x, y, \tau) = \int_{-a}^a d\tau \int_0^\tau \chi(t - \tau, x, y - \eta) dt, \quad (9)$$

$$\text{где } q(t, x, y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_r K_p^m(y - \eta, x) e^{pt} dp,$$

$$\chi(y, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m(y) 2e^{-\tau} L_m(2\tau) \quad L_m(2\tau) -$$

полиномы Лагера

$$K_p^m(y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t\beta(y-\eta)}}{l_{m,\beta p}} \quad l_{m,\beta p} - \text{выра-$$

жение, учитывающее теплофизические свойства слоёв / $k=0-m$ /, их толщину и граничные условия.

Напряженно-деформированное состояние слоистой полуплоскости также оценивается методом разрывных решений. Границы раздела $x=a_k$ ($k=0$) рассматриваются как дефекты, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений.

Построение разрывных решений уравнений Ламе с заданными скачками осуществляется с помощью функций Треффца:

$$\bar{v} = \psi_1 + (x - a)\psi'_0, \quad \bar{v} = \psi_2 + (x - a)\psi'_0;$$

$$\psi'_0 = \frac{\psi'_1 + \psi'_2}{3 - 4\eta}, \quad e = \psi'_1 + \psi'_2 + \psi'_0 \quad (10)$$

$$\text{где } \Delta\psi_0(x, y) = 0, \Delta\psi_j(x, y) = b_k^j T^{(j)}, (j = 1, 2)$$

$$" \cdot " \frac{\partial}{\partial x}, " \cdot " \frac{\partial}{\partial y}$$

Напряжения находят по формулам:

$$\sigma_x = (1 - \mu)\psi'_0 + \psi'_1 + (x - a_k)\psi''_0;$$

$$\sigma_y = -\mu\psi'_0 + \psi'_2 + (x - a_k)\psi''_0 \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \psi_1^2 + 2(x - a_k)\psi'_0 + \psi'_2 + \psi_0'$$

Применение обобщенных преобразований Фурье по переменным x, y к уравнениям /2/, /3/, /6/, /7/ с учетом /10/ позволяет получить рекуррентные соотношения, связывающие смещения и направления в k -м слое с напряжениями и смещениями, формируемыми в первом слое под действием нестационарных температурных полей.

Влияние неоднородностей в поверхностном слое феррокерамических сплавов на интенсивность трещино- и сколообразования при шлифовании исследуется следующим образом. В условиях неравномерного нагрева в поверхностном слое возникают тепловые деформации, которые вызывают температурные напряжения. Под действием этих напряжений, концентрирующихся в местах расположения дефектов, и происходит образование шлифовочных трещин.

Так, исследование интенсивности напряжений в вершинах дефекта длиной $2l$, расположенного на глубине σ^* , когда на поверхности тела $|x=0, |y| \leq a^*$ задан тепловой поток q , позволило установить предельное значение этого потока q^* при котором указанный дефект начинает развиваться в магистральную трещину:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{\alpha_2 E l \sqrt{\pi} \sigma^*}$$

Взаимное влияние дефектов на интенсивность напряжений, сказывается при расположении их на расстоянии друг от друга не более $\sigma^* = \frac{1}{3}$. При этом наименьшая трещиностойкость материала достигается если дефекты ориентированы относительно друг друга под углом $\varphi = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4}$. Геометрия и свойства включений могут создавать условия как для торможения, так и для развития шлифовочных трещин. Если тепловой поток направлен параллельно большей оси эллиптического включения и прямолинейной термоизолированной трещине, то при коэффициенте линейного температурного расширения α_i^B включения больше, чем основного материала $\alpha_i^M / \alpha_i^B > \alpha_i^M / \alpha_i^M$, увеличение жесткости включения приводит к возрастанию K_I , для различных отношений коэффициентов теплопроводности, составляющих материала.

Это приводит к снижению трещиностойкости поверхностного слоя. Для дефектов типа трещин, находящихся в слое с меньшим коэффициентом α_i , ориентация дефекта сильно влияет на величину КИН.

Для бездефектной обработки феррокерамических сплавов, имеющих трещиноподобные дефекты и включения, при выборе режимов обработки и характеристик инструмента следует руководствоваться предельными значениями теплового потока, формирующегося при шлифовании, чтобы наследственные дефекты не вышли из равновесного состояния.

Стохастическая модель трещинообразования при шлифовании металлов гетерогенной структуры построена на базе комплексного подхода, опирающегося на результаты детерминированной теории развития отдельных дефектов и методы теории вероятностей. Поверхностный слой рассматривается как среда, ослабленная случайными не взаимодействующими между собой дефектами – трещинами включениями, определяющие параметры которых являются случайными величинами с известными законами их вероятностного распределения. Исследуется вероятность разрушения поверхностного слоя в зависимости от различных типов вероятностного распределения размеров /длины, глубины/ дефектов, их ориентации. С этих же позиций рассматриваются вероятностные характеристики предельного теплового потока. Установлено, что увеличение однородности материала приводит к возрастанию значения теплового потока, соответствующего фиксированной вероятности разрушения.

Для повышения магнитных свойств, сохранения качественных характеристик рабочих поверхностей и геометрии броневых сердечников и сегментов, разработаны новые станки и инструмент (рис. 2), с использованием ряда приспособлений и конструкций, позволяющих производить шлифование партиями изделий с одной установки.

Литература

1. Рабкин Л.И., Слискин С.А., и др. Ферриты. Строение, свойства, технология производства. – Л: Энергия, 1968. – 384 с.
2. Якимов А.В., Усов А.В. и др. Теплофизика механической обработки. – К.: Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
3. Усов А.В., Дубров А.Н. и др. Моделирование систем с распределенными параметрами. – Одесса: Астропринт, 2002. – 664 с.
4. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. – М. Наука, 1965. – 474 с.

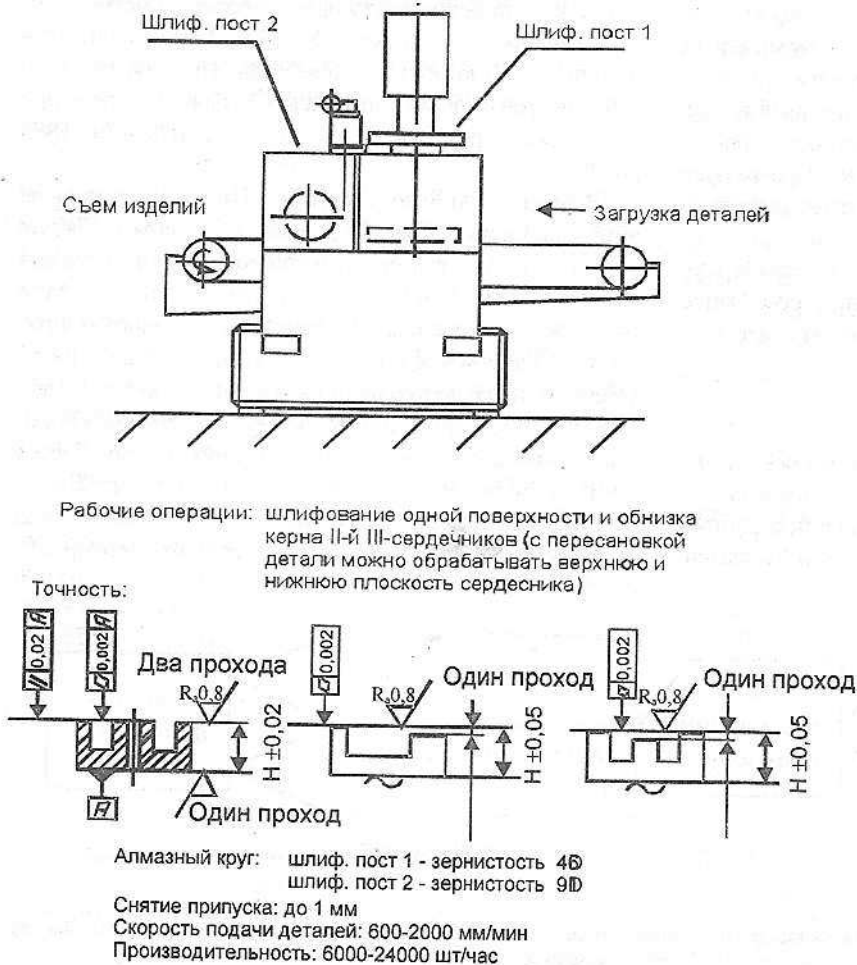


Рис. 2. Высокопроизводительное плоское шлифование Ш и П-образных броневых сердечников