

УДК 621.787.4

Н.В. Рязанова-Хитровская, И.Н. Пыжов, д-р техн. наук, Н.В. Крюкова,  
Харьков, Украина

## **НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ**

*Наводиться аналіз стану питання в області алмазного вигладжування. Особливу увагу приділено питанням можливості теоретичного розрахунку сил і температури при обробці. Висунута ідея про можливість підвищення ефективності процесу шляхом управління контактними напруженнями в зоні вигладжування на базі досліджень напружено-деформованого стану системи шляхом 3D моделювання методом скінчених елементів.*

*Приводится анализ состояния вопроса в области алмазного выглаживания. Особое внимание уделено вопросам возможности теоретического расчета сил и температуры при обработке. Выдвинута идея о возможности повышения эффективности процесса путем управления контактными напряжениями в зоне выглаживания на базе исследований напряженно-деформированного состояния системы путем 3D моделирования методом конечных элементов.*

*The analysis of the prior art in the field of diamond smoothing is carried out. Special attention is paid to the possibility of theoretical computation of the forces and temperatures during processing. The idea that it is possible to increase the efficiency of the process by means of controlling the contact stresses in the smoothing zone on the basis of investigations of deflected mode of the system by means of 3D simulation using finite element method is proposed.*

**1. Постановка проблемы.** Одним из методов отделочной обработки, обеспечивающих существенное улучшение эксплуатационных свойств деталей машин, является алмазное выглаживание. Алмазное выглаживание сопоставимо с такими методами обработки, как суперфиниш, хонингование, полирование, тонкое шлифование, тонкое точение, обработка роликами и шариками. Вопрос о целесообразности применения выглаживания вместо других методов отделочной обработки необходимо решать в каждом конкретном случае с учетом как технических требований к обрабатываемой поверхности и необходимой производительности, так и надежности обработанных деталей.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** При подготовке данного раздела за основу был принят источник [1]. Процесс алмазного выглаживания, впервые предложенный фирмой «Дженерал электрик» (США) в 1962 г., является сравнительно новым и эффективным методом отделочно-упрочняющей обработки, применяемым для выглаживания наружных и внутренних поверхностей вращения с цилиндрическим, коническим или фасонным профилем, а также для обработки торцовых и плоских

поверхностей. Его сущность заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности заготовки в результате воздействия на неё алмазного выглаживающего инструмента, упруго или жестки закрепленного в специальной державке. Если говорить в целом, то метод позволяет существенно снизить шероховатость поверхности ( $R_a \leq 0,3$  мкм); обеспечить степень упрочнения поверхностного слоя деталей на 10...30% при глубине слоя 0,01...0,3 мм; создать в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения величиной до 500-700 МПа и обеспечить более однородную структуру материала. При этом точность формы остается практически исходной или незначительно улучшается, а изменение размеров ( $\Delta d$ ) происходит в пределах исходной высоты микронеровностей  $R_{Z\text{исх.}}$  и может быть определено по зависимости:  $\Delta d = 1,1 \div 1,5 \cdot R_{Z\text{исх.}}$ .

Благодаря тому, что процесс выглаживания обеспечивает увеличение предела выносливости и сопротивления усталости деталей и, как следствие, повышает их надежность и долговечность, он нашел применение в автомобильной, авиационной, машиностроительной и др. отраслях промышленности. Он может быть использован для обработки даже металлов, подвергнутых покрытиям.

Основными параметрами процесса выглаживания, влияющими на качество поверхности и производительность обработки, являются: напряженное состояние в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, скорость деформирования и кратность приложения нагрузки к каждой точке обрабатываемой поверхности. Напряженное состояние в зоне контакта может быть охарактеризовано средним давлением на площади контакта и определяется механическими свойствами обрабатываемого материала, размером рабочей части инструмента и глубиной его внедрения в обрабатываемую поверхность (или приложенной к нему силой).

*Обрабатываемые материалы и детали.* Алмазным выглаживанием можно обработать почти все применяющиеся в промышленности металлы и сплавы, поддающиеся пластической деформации в холодном состоянии. Это закаленные и незакаленные стали, цветные металлы, хромированные, никелированные и другие детали. Исключением являются такие материалы как титан, цирконий [2] и ниобий [3], которые при выглаживании интенсивно налипают на рабочую часть выглаживателя.

Выглаживанием можно обрабатывать наружные и внутренние цилиндрические поверхности, плоские и некоторые виды профильных поверхностей – цилиндрические шейки валов, детали топливной аппаратуры, штоки, цилиндры, поршневые пальцы, втулки, направляющие станков, кольца подшипников и другие детали, к рабочим поверхностям которых предъявляются высокие требования, а также тонкостенные и маложесткие детали.

Однако не во всех случаях можно применить этот метод. Алмазное выглаживание чувствительно к неравномерной твердости, которая является следствием некачественной термической обработки. Основные параметры процесса – радиус выглаживателя и сила выглаживания выбираются в зависимости от твердости обрабатываемой поверхности. Поэтому на участках с повышенной твердостью эффективность обработки снижается, а на участках с пониженной, по сравнению с расчетной, твердостью вследствие чрезмерного внедрения выглаживателя происходит ухудшение качества поверхности и возможно появление вибраций. Твердость выглаживаемой поверхности должна строго выдерживаться в заданных пределах. Например, для закаленных сталей разброс твердости обрабатываемой поверхности не должен превышать 2-3 единицы твердости по Роквеллу.

Вследствие хрупкости алмаза затруднительна обработка прерывистых поверхностей – со шпоночными канавками, шлицами, поперечными отверстиями, так как при этом возникают сильные ударные нагрузки, которые могут вызвать сколы на рабочей поверхности алмаза. Выглаживание поверхностей, имеющих поперечные канавки, затруднений не представляет. При отсутствии фаски со стороны входа и выхода выглаживателя образуется заусенец, поэтому в таких местах необходимо предусматривать фаску или удалять после выглаживания заусенец. Затруднительно выглаживание цилиндрических поверхностей с упором в торец. В этом случае необходимо предусматривать канавки или допускать невыглаженный участок шириной 2 - 3 мм, прилегающий к торцу.

Выглаживание можно производить на обычных универсальных и специальных станках: токарных, токарно-винторезных, расточных, алмазно-расточных, строгальных, вертикально-фрезерных и агрегатных с нормальной и повышенной точностью. Вследствие малых сил при выглаживании станки мало изнашиваются. Наиболее распространенным является выглаживание па токарных станках. При этом особое внимание следует обращать на величину радиального биения шпинделя (не более 0,01 - 0,02 мм) и жесткость суппорта. При выглаживании с жестким закреплением выглаживателя к станку предъявляются повышенные требования точности. Подача при выглаживании должна быть равной 0,02 - 0,08 мм/об если на станке такие подачи не предусмотрены, необходима соответствующая перенастройка механизма подачи [4].

При выглаживании обычно применяются скорости до 150 м/мин, поэтому привод станка должен обеспечить возможность работы на таких скоростях. Станок должен быть также оснащен устройством для подачи СОТС.

*Шероховатость обработанной поверхности.* Минимальная величина шероховатости, достижимая при алмазном выглаживании, определяется

размером рабочей части алмаза значением подачи, шероховатостью рабочей части алмаза, величиной пластических искажений [1].

Так, например, относительно влияния подачи  $S$  на шероховатость справедлива классическая зависимость (для конкретного радиуса выглаживателя  $r$  без учета упругого восстановления и пластических искажений профиля) [5]:

$$R_z = r - \frac{\sqrt{4 \cdot r^2 - S^2}}{2}.$$

Основное влияние на наименьшую достижимую величину шероховатости оказывает величина пластического искажения неровностей. Величина пластических искажений микропрофиля тем меньше, чем менее пластичен обрабатываемый материал. Для малопластичных материалов (цементированные и закаленные стали) величина пластических искажений профиля гораздо меньше, поэтому наименьшая достижимая величина шероховатости для закаленных сталей меньше. Так, например, шероховатость при выглаживании закаленной стали ШХ15 составляет  $Ra \approx 0,012$  мкм при исходной шероховатости  $Ra = 0,1 - 0,05$  мкм. При выглаживании мягкой стали 45 с исходной шероховатостью  $Ra = 0,1 - 0,05$  мкм получена шероховатость не выше  $Ra = 0,025$  мкм. Такие же результаты получены и другими исследователями [3]. Было проведено сравнение обработанных поверхностей ( $Ra = 0,1$  мкм), полученных различными способами (при прочих равных условиях) по такому критерию как относительная опорная длина профиля  $\eta$ . Оно показало, что для уровня сечения профиля равного 20 % ее величина для выглаженной поверхности равна 35%, для суперфинишированной – 17 %, для полированной – 12 %, и для шлифованной – 4 %.

Исходная шероховатость не всегда может быть полностью сглажена. Это зависит от ее высоты, а также от пластичности обрабатываемого материала. При малой пластичности обрабатываемого материала и большой высоте исходных неровностей они сглаживаются лишь частично. Как при полном, так и при частичном сглаживании исходной шероховатости профиль вновь образующихся неровностей имеет округлую форму, отличную от формы неровностей, полученных при обработке резанием.

*Сила выглаживания.* Величина сил выглаживания зависит от радиуса и формы рабочей части выглаживателя, пластичности и шероховатости обрабатываемой поверхности, от глубины внедрения выглаживателя в обрабатываемую поверхность, подачи и некоторых других факторов.

Основной силой, создающей необходимое давление в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью, является нормальная составляющая  $P_y$ . Составляющие  $P_x$  и  $P_z$  в 10-20 раз меньше нормальной

силы [1, 6-8]. Поэтому в качестве силы выглаживания  $P$  можно принимать ее нормальную составляющую  $P_y$  (ошибка не превышает 1-1,5%).

На основании приближенного решения задачи о скольжении жесткого радиусного выглаживателя по пластической поверхности зависимости  $P_y$  можно представить следующими уравнениями:

$$P = P_y = C_y \cdot R \cdot h \cdot \sigma_\tau; \quad (1)$$

где  $C_y$  – коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки;  $R$  – радиус рабочей части выглаживателя, мм;  $h$  – глубина внедрения выглаживателя, мм;  $\sigma_\tau$  – предел текучести обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>.

Для расчета силы выглаживания можно пользоваться формулой (1) заменив абсолютную глубину внедрения выглаживателя  $h$  относительной глубиной:

$$P = C \cdot \varepsilon \cdot \sigma_\tau \cdot R^2,$$

где  $C$  – коэффициент, равный  $\pi$ .

Нормальное протекание процесса выглаживания происходит при определенных значениях относительной глубины внедрения  $\varepsilon$  инструмента в обрабатываемую поверхность. При относительной глубине внедрения, меньшей определенной величины  $\varepsilon_1$ , инструмент с обрабатываемой поверхностью имеет упругую связь и выглаживания не происходит. При относительной глубине внедрения, большей определенной величины  $\varepsilon_2$ , пластическое течение материала прекращается и начинается разрушение поверхностного слоя детали. Нормальное протекание процесса обеспечивается при  $\varepsilon_2 > \varepsilon > \varepsilon_1$ .

Условие перехода от упругой деформации к пластической, т. е. условие начала процесса выглаживания по данным И.В. Крагельского [9]:

$$\varepsilon_1 = \frac{h}{R} = 240 \frac{\sigma_\tau^2}{E^2}.$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа.

Однако, большинство расчетов проводятся только по отношению глубины внедрения к радиусу инструмента.

Расчеты показывают, что практические значения  $\varepsilon_1$ , при которых начинается процесс выглаживания, равны 0,002 - 0,004 для закаленных сталей и 0,0002 - 0,0007 для мягких материалов. Максимальная величина относительной глубины внедрения  $\varepsilon_2$ , при которой пластическое течение материала начинает сопровождаться отделением части металла, равна

0,2 - 0,3 (по данным И.В. Крагельского и др.). Однако допустимое внедрение алмаза ограничивается глубиной, при которой вид обрабатываемой поверхности ухудшается, возникает ее перенаклеп и появляются вибрации. Относительную глубину внедрения  $\varepsilon_2=0,01 - 0,02$  можно считать предельной.

Максимальная и минимальная допустимые величины силы выглаживания задаются исходя из необходимости обеспечения стабильности качества выглаженной поверхности. Задав величины максимального и минимального пределов силы выглаживания, можно определить допустимые значения скорости выглаживания.

*Тепловые явления.* Затрачиваемая в процессе выглаживания энергия почти вся переходит в тепло, нагревающее деталь и инструмент. Нагрев тонких поверхностных слоев детали в процессе обработки влияет на качество обработанной поверхности, на величину и знак остаточных напряжений, структурное и фазовое состояние металла.

В работе [ ] на основании аналитического расчета тепловых потоков рекомендуется формула, позволяющая рассчитать максимальную температуру на площадке контакта выглаживателя с деталью (единицы измерения приводятся согласно оригиналу):

$$\Theta_{\max} = \frac{4 \cdot P_z \cdot a_{\partial} \cdot \tau_m + L}{I \cdot l \cdot \Delta \lambda_{\partial} \cdot \left[ \frac{4\sqrt{2} \cdot a_{\partial} \cdot \lambda_u}{\Delta V \cdot \lambda_{\partial}} \cdot \tau_0 + L + I \right]}, \quad (2)$$

где  $P_z$  – тангенциальная сила при выглаживании в Н;  $a_{\partial}$  – коэффициент температуропроводности материала детали в  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{\partial}$  и  $\lambda_u$  – соответственно коэффициенты теплопроводности материалов детали и инструмента в  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $I$  – термический эквивалент работы в  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $l$  – радиус пятна контакта выглаживателя с деталью в м;  $\Delta$  – глубина проникновения пластических деформаций в центре площадки контакта и м;  $V$  – скорость алмазного выглаживания в м/с;  $L$  – безразмерная величина, учитывающая повышение температуры на площадке контакта от тепла, полученного деталью на предыдущих оборотах;  $\tau_0$  и  $\tau_m$  – безразмерные критерии.

Анализ формулы (2) показывает, что при увеличении скорости выглаживания температура на площадке контакта возрастает, причем наиболее нагретые участки, расположенные за центром теплового источника, смещаются к концу площадки контакта. Экспериментальную проверку температур в зоне контакта выглаживателя с деталью проводили с помощью полупроводниковой термопары, сигнал которой регистрировался электронным осциллографом [3]. На рис. 1 показаны сравнительные данные расчетных и экспериментальных значений максимальной температуры на площадке контакта от скорости выглаживания закаленной стали ШХ15 (HRC 62-64).

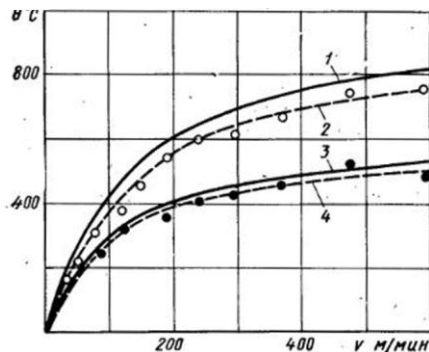


Рисунок 1 – Зависимость максимальной температуры на площадке контакта  $\Theta$  выглаживателя с деталью от скорости  $V$  [1]  
Условия обработки:  $R_{сф}=2$  мм; 1, 3 – расчетные значения, 2, 4 – экспериментальные значения температуры

Наибольшая скорость выглаживания, ограничиваемая теплостойкостью алмаза, равна 400–600 м/мин. При обычно применяемых скоростях выглаживания (менее 100 м/мин) максимальные температуры на площадке контакта не превышают 200–400 °С. Можно полагать, что такие сравнительно невысокие и кратковременно действующие температуры не вызывают существенных изменений в структурном состоянии металла; однако они оказывают влияние на его напряженное состояние.

*Остаточные напряжения.* При механической обработке в поверхностных слоях деталей возникают остаточные напряжения, которые влияют на эксплуатационные качества обработанной поверхности. Появление остаточных напряжений вызывается пластической деформацией и нагревом поверхностного слоя в процессе обработки. В результате действия пластической деформации возникают сжимающие остаточные напряжения, а действие температурного фактора приводит к возникновению растягивающих остаточных напряжений. Кроме того, в поверхностных слоях при механической обработке возможны фазовые превращения и связанные с этим объемные изменения, что также вызывает появление остаточных напряжений.

При алмазном выглаживании поверхностный слой обрабатываемой детали испытывает интенсивную пластическую деформацию, нагрев же его невелик. Все это должно обуславливать появление в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

Установлено, что напряженное состояние поверхностного слоя существенно зависит от формы рабочей части выглаживателя. Если при выглаживании инструментами сферической формы максимальные тангенциальные напряжения находятся на некоторой глубине, то при

выглаживании инструментами цилиндрической формы они находятся на поверхности детали. Глубина распространения их значительно меньше (0,15 - 0,20 мм), чем при выглаживании инструментами сферической формы [7-8].

В поверхностном слое после алмазного выглаживания создаются значительные по величине сжимающие остаточные напряжения, плавно изменяющиеся по глубине поверхностного слоя. Общая глубина залегания сжимающих напряжений может составлять до 0,45 мм. Максимум тангенциальных остаточных напряжений располагается на глубине 0,03-0,10 мм. Основным фактором процесса выглаживания, влияющим на напряженное состояние, является сила нормального давления. Изменяя величину силы, можно регулировать величину и глубину распространения остаточных напряжений в широких пределах.

**3. Цель исследования.** Целью настоящей работы является установление возможных путей повышения эффективности процесса алмазного выглаживания.

#### **4. Материалы исследований.**

На основании анализа источников информации нами была выдвинута идея о возможности повышения эффективности процесса выглаживания путем управления контактными напряжениями в зоне обработки на базе исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) системы путем 3D моделирования методом конечных элементов [10, 11].

*Компьютерное моделирование.* В настоящее время в мировой практике наблюдается тенденция перехода от двухмерного к трехмерному моделированию, что связано с необходимостью повышения адекватности и информационной достаточности моделей. Предпосылкой такого перехода является развитие метода конечных элементов (МКЭ) аппаратных возможностей вычислительной техники и программного обеспечения. Новые возможности моделирования процесса поверхностного пластического деформирования открылись с появлением пакетов программ по МКЭ типа SolidWork, Nostran, Ansys, LS-Dyna и др. Отметим, что существующие теоретические модели, основанные на аналитическом описании, и численные модели в рамках статической постановки задачи, не дают возможности в полной мере воспроизвести реальную картину развития процессов, протекающих в тонком поверхностном слое в условиях выглаживания.

Задачу повышения эффективности процесса выглаживания можно разделить на два направления. Первое связано с изготовлением самого выглаживателя, а второе – с его эксплуатацией.

Использование компьютерных технологий на стадии изготовления алмазного выглаживателя дает возможность уменьшить время на проектирование и в дальнейшем избежать различного рода неполадок в работе инструмента [11].

Моделирование процесса изготовления алмазного выглаживателя проходило в следующем порядке:

- создание модели выглаживателя (державка – припой – покрытие - алмаз);
- создание процесса термосилового нагружения.

На рис. 2 показан результат исследования НДС при запайке алмаза в корпус.

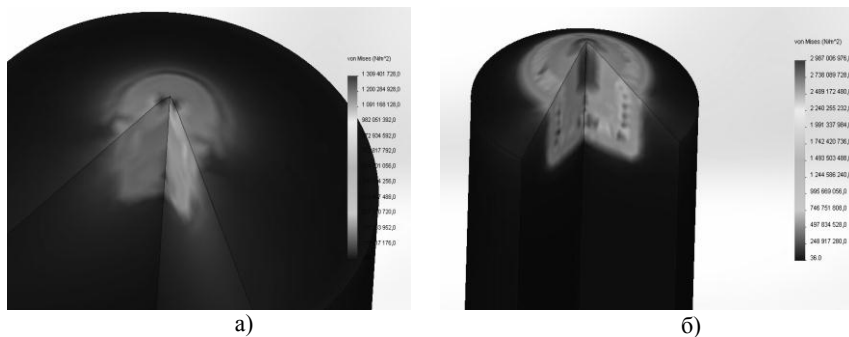


Рисунок 2 – Результаты расчета НДС при изготовлении алмазного выглаживателя:  
а) – алмаз без покрытия; б) – алмаз с никелевым покрытием

Установлено, что при одинаковых температурных и силовых факторах наличие на алмазе металлического покрытия способствует сохранению целостности алмаза что, несомненно, положительным образом скажется как на проценте брака при изготовлении инструментов, так и на их работоспособности. Это доказывает необходимость использования покрытия при изготовлении инструмента.

**5. Выводы и перспективы развития.** Таким образом, уже на стадии изготовления алмазных выглаживателей можно повысить эффективность процесса выглаживания в целом. Применение металлического покрытия на алмазе позволяет, во-первых, увеличить удержание алмаза в державке инструмента, а во-вторых, избежать растрескивания алмаза при изготовлении. В целом это способствует повышению общего срока службы алмазного выглаживания и улучшению качества обработки.

В дальнейшем представляет значительный интерес вопрос углубления представлений о физических явления, протекающих в контактной зоне. Это можно сделать на основе использования компьютерного программного пакета CosmosWorks, являющегося приложением к SOLIDWORKS. Это позволит при существенном снижении затрат на проведение исследований изучить НДС в системе «Алмаз – металлическое покрытие – припой - ОМ»,

что в свою очередь даст возможность уточнить рациональные условия реализации процесса алмазного выглаживания и в конечном итоге позволит в целом повысить его эффективность путем управления контактными напряжениями.

**Список использованных источников:** 1. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. «Машиностроение». 1972, – 105 с. 2. Хворостухин Л.А., Пleshивцев Н.В., Бибеев В.Н. Отделочно-упрочняющая обработка алмазным выглаживанием. «Вестник машиностроения». 1969. № 8. 3. Чекин Г.И. О процессе алмазного выглаживания. «Вестник машиностроения», 1964, № 8. 4. Hull E.H. Diamond burnishing «Machinery (N.Y.)». 1962. v. 68. N5. 5. Исаев А.И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке / А.И. Исаев. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. -108с. 6. Гурин Ф.В., Смелянский В.М. Натяг и сила при алмазном выглаживании с жестким закреплением инструмента. Сб. «Новые процессы обработки резанием». М., «Машиностроение», 1968. 7. Резников А.Н., Барац Я.И. Применение алмазного выглаживания для отделочно-упрочняющей обработки. «Вестник машиностроения», 1970, № 1. 8. Чекин Г.И. Алмазное выглаживание закаленных сталей. «Вестник машиностроения», 1965. № 6. 9. Крагельский И.В. Трение и износ. М., «Машиностроение», 1968. 10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике – М.: Мир, 1975. 11. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Torbilo V.M. Almaznoe vyglazhivanie. «Mashinostroenie». 1972, – 105 s. 2. Hovorostuhin L.A., Pleshivcev H.V., Bibaev V.N. Otdelочно-uprochnjajushhaja obrabotka almaznym vyglazhivaniem. «Vestnik mashinostroenija». 1969. № 8. 3. Chekin G.I. O processe almaznogo vyglazhivaniya. «Vestnik mashinostroenija», 1964, № 8. 4. Hull E.H. Diamond burnishing «Machinery (N.Y.)». 1962. v. 68. N5. 5. Isaev A.I. Mikrogeometrija poverhnosti pri tokarnoj obrabotke / A.I. Isaev. – M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1950. -108s. 6. Gurin F.V., Smeljanskij V.M. Natjag i sila pri almaznom vyglazhivanii s zhestkim zakrepleniem instrumenta. Sb. «Novye processy obrabotki rezaniem». M., «Mashinostroenie», 1968. 7. Reznikov A.N., Barac Ja.I. Primenenie almaznogo vyglazhivaniya dlja otdelочно-uprochnjajushhej obrabotki. «Vestnik mashinostroenija», 1970, № 1. 8. Chekin G.I. Almaznoe vyglazhivanie zakalennyh stalej. «Vestnik mashinostroenija», 1965. № 6. 9. Kragel'skij I.V. Trenie i iznos. M., «Mashinostroenie», 1968. 10. Zenkevich O. Metod konechnyh jelementov v tehnikе – M.: Mir, 1975. 11. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Fedorovich V.A. 3D modelirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija. – Har'kov: NTU «HPI», 2006. – 364s.