

УДК 621.787

**В.В. ДОМАСЕВИЧ**инженер-конструктор бюро сталеплавильного производства управления проектирования и реконструкции<sup>1</sup>  
E-mail: domasevich-v@yandex.ru**М.П. КУЛЬГЕЙКО**, канд. техн. наук, доц.доцент кафедры «Графика»<sup>2</sup>  
E-mail: kulgeyko82@rambler.ru<sup>1</sup>ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Республика Беларусь<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.02.2020.

## К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ

*Рассмотрена физическая модель деформационного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе поверхностно-пластического деформирования методом алмазного выглаживания. Представлена поэтапная схема формирования поверхности детали при алмазном выглаживании с упругим и жестким закреплением инструмента. При общей стационарности процесса выглаживания в условиях установившегося режима выделяются два нестационарных периода, характеризующиеся нестабильностью условий формирования поверхности. Причины и условия неравномерности протекания процесса иллюстрируются схемами деформации поверхности при упругом и жестком закреплении алмазного наконечника. Показана последовательность этапов формирования поверхностного слоя в начальный период нестационарности процесса, когда инструмент вступает в контакт с обрабатываемой поверхностью, и в конечном нестационарном периоде, когда инструмент выходит с контактного взаимодействия с обрабатываемой деталью. При этом отмечаются особенности в деформационной картине переходных периодов обработки упругим и жестким инструментом. Нестабильность параметров контактного взаимодействия инструмента и детали в нестационарные периоды алмазного выглаживания обуславливает вероятность образования дефектных участков на обработанной поверхности. Приводятся выражения для определения параметров рельефа переходных участков выглаженной поверхности и дана оценка длины переходной зоны на входе инструмента в контактное взаимодействие с деталью и на выходе из контакта в зависимости от твердости обрабатываемого материала. Вероятную длину переходных участков, характеризующихся отклонением диаметральных размеров и формы поверхности, следует учитывать при конструировании функциональных элементов детали и проектировании технологического процесса отделочно-упрочняющего выглаживания.*

**Ключевые слова:** алмазное выглаживание, поверхностно-пластическое деформирование, нестационарность, модель, деформация

**Введение.** Повышение надежности и долговечности деталей машин является одной из важнейших проблем современного машиностроения. Обеспечение требуемых эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей может быть достигнуто совершенствованием технологии их обработки, позволяющей управлять физико-механическими и геометрическими параметрами поверхностного слоя. Задача состоит в создании поверхности, обладающей свойствами, отличными по отношению к основному объему материала детали.

Основная роль в создании поверхности принадлежит окончательным (отделочным) финишным технологиям обработки материалов. В современном машиностроении прикладная инженерия поверхности обладает большим разнообразием технологических методов генерации поверх-

ностного слоя [1–3]. Они отличаются способом энергетического воздействия, определяющего физико-механические и электрохимические явления, лежащие в основе обеспечения заданных свойств поверхностного слоя детали. При всей сложной совокупности явлений, происходящих в поверхностном слое, каждый из методов характеризуется своим доминирующим процессом, определяющим изменение состояния поверхности и ее свойств. Это может быть изменение химического состава и структуры поверхностного слоя, шероховатости поверхности, образование (наращивание) нового слоя в виде пленки или покрытия и т. п. Выбор конкретного метода повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя определяется технологическими, экономическими, экологическими и другими факторами.

**Постановка задачи.** Одним из перспективных направлений генерации поверхности является формирование заданной микрогеометрии и структуры поверхностного слоя без удаления материала, практически не изменяя исходную точность размеров. Это, прежде всего, эффективные отделочно-упрочняющие технологии на основе методов обработки путем пластического деформирования поверхностных слоев материала [3–7]. Методы обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД) основаны на способности металла пластически деформироваться в холодном состоянии под внешним силовым воздействием без нарушения его целостности.

При отделочно-упрочняющей обработке металлов способами ППД повышается поверхностная твердость, пределы текучести и упругости, создаются остаточные напряжения сжатия, на поверхности отсутствуют термические дефекты [8, 9]. Поверхность выглаживается, т. е. снижается высота микронеровностей, вершины выступов становятся более пологими, увеличивается площадь опорной поверхности [10, 11]. Все это существенно повышает усталостную износостойкость, прочность и долговечность деталей машин.

По характеру силового воздействия способы ППД можно разделить на квазистатические и динамические. При квазистатических способах обработки инструмент воздействует на обрабатываемую поверхность с определенной силой на ограниченном участке контакта с заготовкой. При этом зона контакта инструмента с заготовкой и, соответственно, очаг деформации поверхностного слоя постепенно перемещается и проходит всю поверхность, подлежащую обработке. К таким способам ППД относятся: накатывание, раскатывание, выглаживание, дорнование и т. п. При динамических или ударных методах осуществляется импульсное многократное силовое воздействие инструмента, рабочих тел или среды на обрабатываемую поверхность. Это такие способы как обработка дробью, чеканка, ударное накатывание и раскатывание, центробежная обработка и др.

Алмазное выглаживание представляет собой метод отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием, который заключается в деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом — алмазным индентором. Процесс осуществляется при непрерывном контактно-силовом взаимодействии инструмента с обрабатываемой деталью. В результате выглаживания на поверхности детали сглаживаются неровности предшествующей обработки и формируется новый поверхностный слой с другими геометрическими и физико-механическими характеристиками [12, 13]. Преимуществами алмазного выглаживания по сравнению с другими процессами обработки поверхностным пластическим дефор-

мированием являются: высокая стойкость инструмента из природного (синтетического) алмаза, возможность автоматизации процесса, обеспечение благоприятного сочетания параметров шероховатости, микрорельефа поверхностного слоя, микротвердости, величины и характера распределения остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей машин и технологического оборудования. [4, 9, 10, 13].

При реализации технологии отделочно-упрочняющего алмазного выглаживания актуальной задачей является обеспечение стабильности технологических факторов и режимов процесса. Это способствует повышению однородности геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя. При этом, стабильность параметров важно обеспечить на протяжении всего процесса, в том числе, на начальном и конечном участках обрабатываемой поверхности.

**Цель работы:** разработка деформационной модели формирования рельефа поверхностного слоя с учетом нестационарных периодов процесса обработки.

**Результаты исследований и их обсуждения.** Процесс деформирования поверхности при алмазном выглаживании можно считать стационарным в условиях установившегося режима обработки. К стационарным относятся такие процессы обработки давлением, при которых деформационно-силовая картина в любой точке очага деформации не зависит от времени [5]. Это, например, обкатывание, дорнование, выглаживание и т. п. Нестационарными процессами являются все методы динамического воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность детали.

При алмазном выглаживании имеются два нестационарных периода, характеризующиеся нестабильностью условий деформирования поверхности. Это начальный период обработки, когда инструмент вступает в контактное взаимодействие с обрабатываемой поверхностью, до стабилизации условий контактирования, и конечный период, когда инструмента выходит из контакта с поверхностью детали.

Алмазное выглаживание осуществляется с упругим и жестким закреплением инструмента [13]. При обработке упругим инструментом (рисунок 1) силовой режим задается путем назначения силы обработки, т. е. заранее устанавливаются радиальную силу, с которой инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности.

Используемые специальные упругие державки должны обеспечивать постоянство радиальной силы в условиях вынужденных поперечных перемещений инструмента, вызванных радиальным биением, погрешностью формы обрабатываемой поверхности и другими факторами. Так как нет жесткой кинематической связи между деталью и инструментом, положение последнего относи-

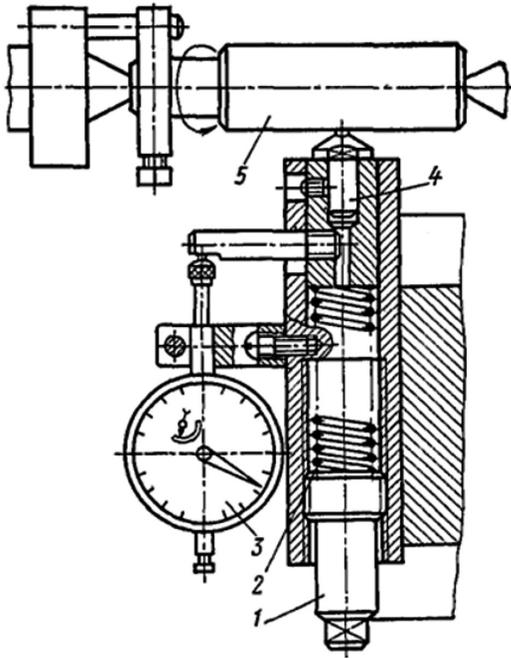


Рисунок 1 — Схема выглаживания упругим инструментом: 1 — регулировочный винт; 2 — пружина; 3 — индикатор; 4 — выглаживатель; 5 — обрабатываемая деталь  
 Figure 1 — Scheme of smoothing with an elastic tool: 1 — adjusting screw; 2 — spring; 3 — indicator; 4 — smoother; 5 — workpiece

тельно детали определяется деформацией обрабатываемой поверхности.

В начальный период выглаживания сферический наконечник при радиальной подаче выглаживателя внедряется в обрабатываемую деталь и образует на поверхности отпечаток в виде пластически деформированной канавки (рисунок 2, положение 1). Кривизна профиля канавки зависит от профиля сферического наконечника выглаживателя. Металл из канавки выдавливается в боковые наплывы  $AB$  на поверхности детали (положение 1). Передний и задний углы выдавливания равны  $\varphi = \varphi_1$ . После включения

продольной подачи выглаживатель на цилиндрической поверхности детали образует след в виде винтовой поверхности с шагом, равным величине подачи  $S$ . Так как величина подачи значительно меньше ширины канавки  $2a$ , то при выглаживании происходит многократное перекрытие следов  $2a/S$  раз.

В результате продольной подачи изменяется характер деформации поверхностного слоя. Площадь контакта выглаживателя с деталью уменьшается за счет уменьшения заднего угла охвата  $\varphi'_1$ . Это приводит к увеличению внедрения выглаживателя в деталь (см. рисунок 2, положение 2). Но при этом со стороны невыглаженной поверхности увеличивается валик деформированного металла  $h_b$  и передний угол охвата  $\varphi'$  (см. рисунок 2, положение 3). Увеличивающийся объем выдавленного в волну металла вызывает рост площади контакта и сопротивление вдавливанию. Это постепенно замедляет и затем приостанавливает углубление выглаживателя в деталь на участке  $BC$  (см. рисунок 2, положение 4).

Дальнейший рост волны металла приводит к постепенному отжиму выглаживателя на участке  $CD$  (см. рисунок 2, положения 4–7). Уровень выглаженной поверхности поднимается и практически находится на уровне исходной поверхности, разница составляет десятки микрометров. Выдавленная волна металла достигает максимального объема и в дальнейшем сохраняет постоянную величину (см. рисунок 2, положения 7–11), которая сформировалась на заходном участке  $BCD$  (см. рисунок 2, положения 1–7).

В результате стабилизации процесса углы вдавливания принимают постоянные значения: передний угол увеличивается до значения  $\varphi''$ , а задний  $\varphi''_1$  изменяется незначительно. Контакт выглаживателя с обрабатываемой поверхностью происходит по дуге (положение 11).

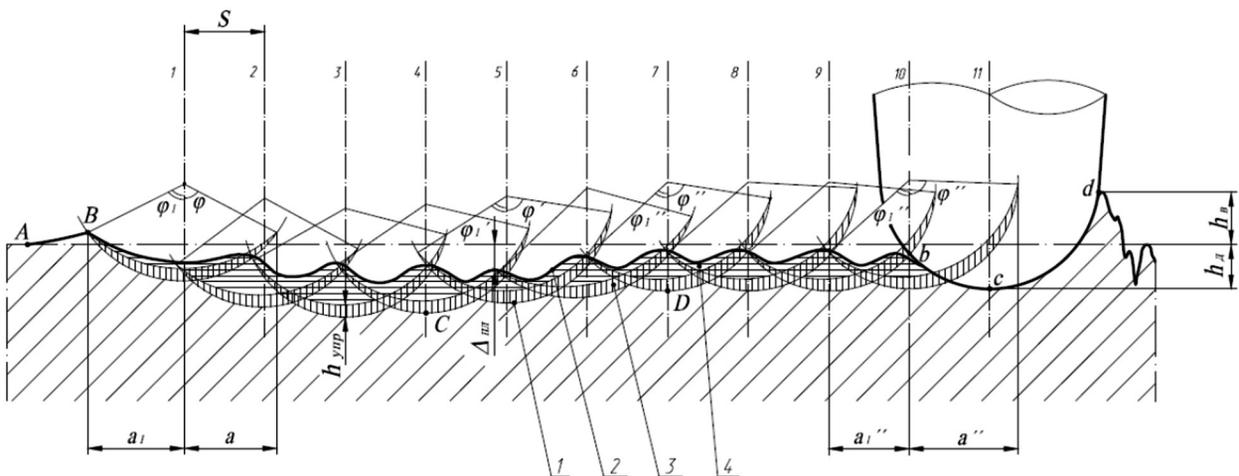


Рисунок 2 — Схема деформации поверхности при выглаживании упругим инструментом: 1 — профиль следа движения выглаживателя; 2 — фактический профиль выглаженной поверхности; 3 — упругое восстановление поверхности; 4 — пластическое искажение профиля

Figure 2 — Scheme of surface deformation when smoothing with the elastic tool: 1 — profile of the trace of the smoothing movement; 2 — actual profile of the smoothed surface; 3 — elastic surface restoration; 4 — plastic profile distortion

В результате пластического деформирования происходит сглаживание исходных неровностей и образование нового микрорельефа поверхности со значительно меньшей высотой неровностей  $Rz_0$ . Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации  $\Delta_{пл}$ .

При обработке жестким инструментом (рисунок 3) силовой режим задается путем предварительного натяга на инструмент, т. е. заранее устанавливается глубина выглаживания. Между инструментом и деталью осуществляется жесткая кинематическая связь, так же, как, например, при точении. Основным технологическим фактором, определяющим процесс выглаживания с жестким инструментом, является величина предварительно заданного натяга  $h_3$ , который задается до начала обработки.

Обработка жестким выглаживанием позволяет несколько повысить точность размеров и формы детали за счет перераспределения объемов пластически деформируемого металла. Однако при большой величине предварительного натяга, в том числе из-за значительного биения и погрешностей формы детали, пластические деформации за пределами исходных микронеровностей приводят к неоднородности шероховатости и физико-механических свойств обрабатываемой поверхности. Поэтому при жестком выглаживании предъявляются более высокие требования к жесткости и точности установки детали и инструмента. Значительный эффект по однородности поверхности достигается, когда выглаживание и предварительная обработка выполняется в одну установку, располагая выглаживатель сразу за режущим инструментом.

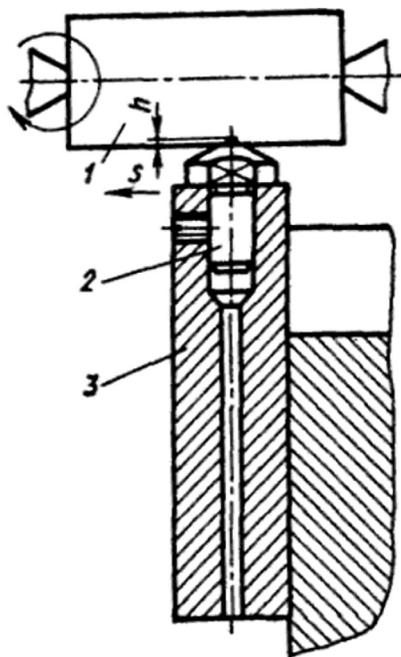


Рисунок 3 — Схема выглаживания жестким инструментом:  
1 — обрабатываемая деталь; 2 — выглаживатель; 3 — державка  
Figure 3 — Scheme of smoothing with a hard tool: 1 — workpiece;  
2 — smoother; 3 — holder

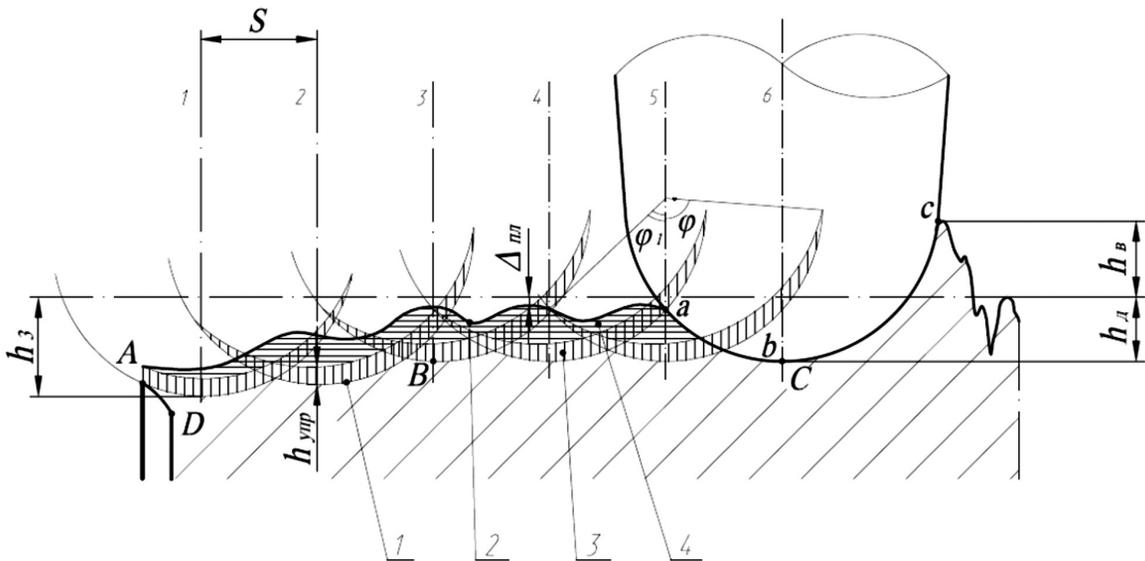
В начальный момент контактного взаимодействия жесткого выглаживателя с обрабатываемой поверхностью (рисунок 4, положение 1) часть пластически деформированного металла выдавливается на торец детали в виде торцевого кольцевого наплыва  $AD$ , а вторая часть — в радиальный кольцевой валик.

Возникшая радиальная составляющая силы выглаживания вызывает отжим детали и инструмента в противоположные стороны, величина предварительно заданного натяга  $h_3$  уменьшается (см. рисунок 4, положение 2). В дальнейшем, в результате продольной подачи инструмента  $S$ , объем деформируемого металла увеличивается и со стороны невыглаженной поверхности перед инструментом образуется волна металла в виде валика  $h_6$ . Возрастает радиальное усилие, отжим детали и инструмента продолжается на участке  $AB$  (см. рисунок 4, положения 1–3). Отжим контактирующих элементов зависит от жесткости технологической системы и будет продолжаться до тех пор, пока радиальная составляющая силы выглаживания не уравновесится силами упругих отжатий детали и инструмента (см. рисунок 4, положение 4). С этого момента процесс выглаживания стабилизируется на участке  $BC$  (см. рисунок 4, положения 3–6), контакт выглаживателя с обрабатываемой поверхностью происходит по дуге (см. рисунок 4, положение 6). Устанавливается постоянная глубина внедрения инструмента в деталь, т. е. процесс выглаживания осуществляется при действительном натяге  $h_d$ .

Окончательное формообразование выглаженной поверхности происходит за инструментом и сопровождается упругими и пластическими деформациями металла, аналогично, как и при выглаживании упругим инструментом.

Деформация поверхностного слоя зависит от силы выглаживания или заданного натяга, а также от геометрических и кинематических факторов процесса. При определенных параметрах и режимах выглаживания создаются условия, когда в приповерхностном слое возникают напряжения растяжения, превышающие по величине сжимающие поверхностные напряжения. Тогда происходит отслаивание поверхностных слоев металла, т. е. известное из практики поверхностно-пластического деформирования явление «шелушения» [5] — разрушение поверхности детали. Процесс выглаживания становится неустойчивым и неконтролируемым.

Наибольшая пластическая деформация обрабатываемой поверхности, следовательно, и максимальное уменьшение размера детали, наблюдается на начальном, т. е. заднем участке выглаженной поверхности. Длину этого участка необходимо учитывать при конструировании функциональных элементов детали, а также при планировании операции обработки рабочей поверхности.



**Рисунок 4** — Схема деформации поверхности при выглаживании жестким инструментом: 1 — профиль следа движения выглаживателя; 2 — фактический профиль выглаженной поверхности; 3 — упругое восстановление поверхности; 4 — пластическое искажение профиля  
**Figure 4** — Scheme of surface deformation when smoothing with the hard tool: 1 — profile of the trace of the smoothing movement; 2 — actual profile of the smoothed surface; 3 — elastic surface restoration; 4 — plastic profile distortion

Для оценки длины заходной части поверхности воспользуемся эмпирической формулой, предложенной в работах [5, 14]:

$$l = 4\sqrt{\frac{P_y}{HB}}, \quad (1)$$

где  $P_y$  — радиальная сила;  $HB$  — твердость материала по Бринеллю.

Принимаем радиальную составляющую силы выглаживания в соответствии с [13]:

$$P_y = c\varepsilon HVR^2, \quad (2)$$

где  $c$  — коэффициент, равный  $\pi$ ;  $\varepsilon$  — относительная глубина внедрения,  $\varepsilon = h/R$  ( $h$  — абсолютная глубина внедрения;  $R$  — радиус рабочей части выглаживателя);  $HV$  — твердость материала по Виккерсу.

Считая приблизительно по DIN50150, что  $HB = 0,95HV$ , после некоторых преобразований получаем:

$$l = 7,3R\sqrt{\varepsilon}. \quad (3)$$

По данным [13] максимальная относительная глубина внедрения, при которой наступает предельный режим выглаживания,  $\varepsilon = 0,01$  — для твердых материалов (закаленная сталь, твердый сплав и т. п.) и  $\varepsilon = 0,02$  — для мягких материалов (конструкционная сталь, цветные металлы (сплавы) и др.). Радиус алмазного наконечника для твердых материалов принимается в пределах  $R = 0,5-2,0$  мм, для мягких материалов —  $R = 2,5-4,0$  мм. Тогда возможная длина заниженного участка поверхности практически может составлять до 2 мм при обработке твердых материалов и до 3 мм при обработке мягких материалов. Выход размера

за пределы допуска даже на небольшой длине может привести к нарушению работоспособности сборочного соединения. В определенных условиях существенное влияние оказывает нестабильность геометрии, в частности, перепад размеров в пределах рабочего участка поверхности [15, 17], например, при обработке подманжетных шеек валов, работающих в условиях гидродинамического трения.

Второй нестационарный период процесса выглаживания наблюдается на конечном участке обработки при выходе инструмента из контакта с деталью. Схема образования и форма переходного участка на выходе инструмента зависит от конструктивного выполнения торцевой части обрабатываемой поверхности.

При выглаживании поверхности с открытым торцом, т. е. при обработке «напроход», началом участка с отличающимся рельефом будет область контакта индентора с поверхностью, когда инструмент еще находится на некотором расстоянии от кромки детали, а валик металла, перемещающийся перед индентором, начинает выходить на кромку (рисунок 5). Здесь валик металла деформируется, часть его перемещается на торец детали, площадь контакта, а, следовательно, и сила сопротивления, уменьшается. Происходит нарушение силового равновесия в системе «индентор — поверхность». В результате выглаживающий наконечник углубляется больше в материал детали, чем на основном участке обрабатываемой поверхности. Характер дальнейшего углубления наконечника определяется величиной натяга, свойствами обрабатываемого материала, силой выглаживания и другими параметрами и режимами процесса обработки.

Максимальная длина переходного участка  $l_1$  (см. рисунок 5) с заниженным диаметральным размером зависит от радиуса  $R$  рабочей части выглаживателя и длины волны  $l_B$  материала детали, образованной движением подачи  $S$  инструмента, и может быть рассчитана по формуле:

$$l_1 = d + l_B, \quad (4)$$

где  $d$  — горизонтальная проекция передней дуги  $cf$  контакта инструмента с заготовкой.

Из треугольника  $Oef$  (рисунок 5) находим:

$$d = \sqrt{2Rh_p - h_p^2}, \quad (5)$$

где  $h_p$  — расчетный натяг, который определяется как сумма действительного натяга  $h_d$  и высоты волны  $h_B$ :

$$h_p = h_d + h_B. \quad (6)$$

Пренебрегая величинами второго порядка малости из выражения (5), получим:

$$d = \sqrt{2Rh_p}. \quad (7)$$

Принимая в соответствии с рекомендациями [5, 6] для отделочно-упрочняющего режима выглаживания  $h_d \approx 1,3Rz_{исх.}$  и  $h_B \approx 0,8Rz_{исх.}$  будем иметь  $h_p \approx 2,1Rz_{исх.}$  Здесь  $Rz_{исх.}$  — исходная шероховатость обрабатываемой поверхности, равная 5 мкм — для твердых и 8 мкм — для мягких материалов.

Тогда горизонтальная проекция дуги контакта будет:

$$d = \sqrt{4,2R \cdot Rz_{исх.}}. \quad (8)$$

Длину волны можно определить по эмпирической формуле [5]:

$$l_B = Ad^B, \quad (9)$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты.

При  $0 < d \leq 0,6$  мм —  $A = 2,9$ ;  $B = 1$ . При  $0 < d < 4$  мм —  $A = 2,1$ ;  $B = 0,5$ .

Следовательно, из (4) будем иметь:

$$l_1 = \sqrt{4,2R \cdot Rz_{исх.}} + A \left( \sqrt{4,2R \cdot Rz_{исх.}} \right)^B. \quad (10)$$

Пользуясь выражением (10), можно оценить возможную длину переходного участка на выходе инструмента. Например, при обработке инструментом с рекомендованными размерами рабочей части выглаживателя, длина этого участка составляет порядка 0,8 мм для твердых и 1,6 мм для мягких материалов. Полученные значения согласуются с экспериментальными данными [5].

При выглаживании поверхностей с закрытым торцом, т. е. при обработке «в упор» также образуется переходный участок, длина которого определяется аналогично. Только в отличие от поверхностей обработанных «напроход», в этом случае имеет место увеличение диаметральных размеров. На поверхности остается волновой валик металла  $afc$  (см. рисунок 5). Его высота с учетом исходных микронеровностей, рассчитанная по формуле (6),

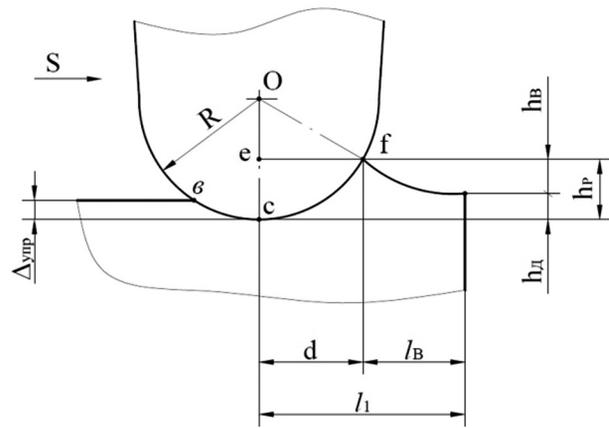


Рисунок 5 — Схема к расчету переходного участка на выходе инструмента  
Figure 5 — Scheme for calculating the transitional section at the tool output

составляет до 11 мкм для твердых и до 17 мкм для мягких материалов, соответственно.

Выход диаметральных размеров за пределы допуска на переходных участках поверхности даже на небольшой длине может привести к нарушению работоспособности прецизионного соединения. В определенных условиях существенное влияние оказывает отклонение формы и размеров в пределах относительно небольшого участка рабочей поверхности [15, 17], например, при обработке подманжетных шеек валов, работающих в условиях гидродинамического трения.

Выглаживание открытых поверхностей «напроход» сопровождается еще одним нежелательным явлением — образованием наплывов металла на торцах детали, как в начале обрабатываемого участка, так и на выходе инструмента. Наплывы на выходе инструмента в 2–3 раза больше, чем на входе [6], и составляют 10–40 мкм для мягких и 5–10 мкм для твердых материалов.

Образующиеся наплывы металла на торцевых поверхностях, как и переходные участки поверхности в большинстве случаев допустимы и не влияют на эксплуатационные свойства деталей машин и их работоспособность. Однако такие дефекты поверхности имеют существенное значение при изготовлении, например, золотниковых и плунжерных пар [18] и других прецизионных деталей гидравлических машин.

**Заключение.** Физическая модель деформационного воздействия инструмента на деталь свидетельствует о наличии нестационарных периодов формирования рельефа поверхности при алмазном выглаживании. Нестабильность параметров контактного взаимодействия обуславливает вероятность образования дефектных участков на обработанной поверхности детали. Отклонение свойств поверхностного слоя на переходных участках следует учитывать при проектировании технологического процесса отделочно-упрочняющего выглаживания.

## Список литературы

- Клименко, С.А. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко, С.А. Чижик, М.Л. Хейфец. — Минск: Белорус. наука, 2017. — 376 с.
- Григорьев, С.Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии / С.Н. Григорьев, Е.В. Смоленцов, М.А. Волосова. — Старый Оскол: ТНТ, 2015. — 279 с.
- Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / И.В. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца и С.А. Клименко. — Минск: Белорус. наука, 2013. — 463 с.
- Бобровский, Н.М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей / Н.М. Бобровский. — Тольятти: ТГУ, 2008. — 170 с.
- Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. — М.: Машиностроение, 2002. — 300 с.
- Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностно-пластическим деформированием: справ. / Л.Г. Одинцов. — М.: Машиностроение, 1987. — 328 с.
- Акулович, Л.М. Самоорганизация процессов упрочняющей обработки / Л.М. Акулович, В.С. Ивашко, М.Л. Хейфец. — Минск: Народная книга, 2008. — 236 с.
- Блюменштейн, В.Ю. Исследование остаточных напряжений поверхностного слоя в процессах поверхностного пластического деформирования / В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2015. — № 3. — С. 41–48.
- Бобровский, Н.М. Распределение температур при выглаживании широким самоустанавливающимся инструментом / Н.М. Бобровский [и др.] // Изв. Самарского научного центра РАН. — 2008. — Вып. 6. — С. 22–30.
- Мельников, П.А. Моделирование процесса формирования микрорельефа обработанной поверхности в зависимости от кинематики формообразования / П.А. Мельников, А.И. Попов, Н.В. Липандина // Вектор науки Тольят. гос. ун-та. — 2010. — № 3(13). — С. 112–114.
- Гуров, Р.В. Методология проектирования операций отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием / Р.В. Гуров // Вестн. БрГТУ. — 2010. — № 4(28). — С. 17–23.
- Губанов, В.Ф. Выглаживание: качество, технологии, инструменты / В.Ф. Губанов. — М.: Издат. дом «Академия Естествознания», 2013. — 70 с.
- Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. — М.: Машиностроение, 1972. — 105 с.
- Браславский, В.М. Технология обкатки круглых деталей роликами / В.М. Браславский. — М.: Машиностроение, 1975. — 160 с.
- Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. — М.: Машиностроение, 1978. — 152 с.
- Рязанова-Хитровская, Н.В. Некоторые пути повышения эффективности процесса алмазного выглаживания / Н.В. Рязанова-Хитровская, И.Н. Пыжов, Н.В. Крюкова // Высokі технології в машинобудуванні. — 2015. — Вып. 1(25). — С. 173–182.
- Мельников, П.А. Оптимизация параметров процесса выглаживания в производственных условиях с целью получения поверхности, пригодной для работы в условиях гидродинамического трения / П.А. Мельников, Н.М. Бобровский // Вектор науки Тольят. гос. ун-та. — 2011. — № 2(16). — С. 65–67.
- Кульгейко, Г.С. Значение функциональной точности поршневой пары аксиальных роторно-поршневых машин / Г.С. Кульгейко, М.П. Кульгейко // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. — 2018. — № 2(73). — С. 7–13.

## DOMASEVICH Vitaliy V.

Design Engineer of the Bureau of Steel Production, Management of Design and Reconstruction<sup>1</sup>

E-mail: domasevich-v@yandex.ru

## KULGEYKO Mihail P., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department “Graphics”<sup>2</sup>

E-mail: kulgeyko82@rambler.ru

<sup>1</sup>OJSC “BSW – Management Company of “BMC” Holding”, Zhlobin, Republic of Belarus<sup>2</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Received 25 February 2020.

## TO THE ISSUE OF THE FORMATION OF THE SURFACE TOPOGRAPHY DURING DIAMOND SMOOTHING

*The article considers the physical model of the deformation interaction of the tool with the surface being treated in the process of surface-plastic deformation by diamond smoothing. A step-by-step diagram of the formation relief of the surface of the part during diamond smoothing with elastic and rigid fastening of the tool is presented. Given the general stationarity of the smoothing process under steady-state conditions, two unsteady periods are distinguished, characterized by instability of the surface formation conditions. The reasons and conditions for the unevenness of the process are illustrated by the surface deformation schemes for elastic and rigid fastening of the diamond tip. The sequence of stages of the formation of the surface layer in the initial period of the unsteady process is shown, when the tool comes into contact with the processed surface, and in the final unsteady period, when the tool leaves the contact interaction with the workpiece. At the same time, features are noted in the deformation pattern of the transitional periods of treatment with an elastic and rigid tool. The instability of the parameters of the contact interaction of the tool and the part in the unsteady periods of diamond smoothing causes the probability of the formation of defective areas on the treated surface. Expressions are given for determining the relief parameters of transitional sections of a smoothed surface and an estimate is given for the length of the transitional zone at the tool input in contact with the part and at the output from the contact, depending on the hardness of the processed*

material. The probable length of the transition sections, characterized by a deviation of the diametrical dimensions and surface shape, should be taken into account when designing the functional elements of the part and designing the technological process of finishing and hardening smoothing.

**Keywords:** diamond smoothing, superficial-plastic deformation, unsteadiness, model, deformation

## References

1. Klimenko S.A., Chizhik S.A., Kheifetz M.L. *Finishnaya obrabotka poverkhnostey pri proizvodstve detaley* [Surface finishing in the production of parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 376 p.
2. Grigorev S.N., Smolentsov E.V., Volosova M.A. *Tekhnologiya obrabotki kontsentriruyemyimi potokami energii* [Technology of processing by the concentrated streams of energy]. Stary Oskol, TNT Publ., 2015. 279 p.
3. Borodavko V.I., Ivashko V.S., Klimenko S.A., Kheifetz M.L. *Obrabotka i uprochnenie poverkhnostey pri izgotovlenii i vostanovlenii detaley* [Surface treatment and hardening in the manufacture and restoration of parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2013. 463 p.
4. Bobrovskiy N.M. *Razrabotka nauchnykh osnov protsessa obrabotki detaley poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem bez primeneniya smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostey* [Development of the scientific bases for the processing of parts by surface-plastic deformation without the use of lubricant-coolants]. Togliatti, Tolyatinskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2008. 170 p.
5. Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening the details of the surface-plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p.
6. Odintsov L.G. *Uprochnenie i odelka detaley poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p.
7. Akulovich L.M., Ivashko V.S., Kheifetz M.L. *Samoorganizatsiya protsessov uprochnyayushchey obrabotki* [Self-organization of hardening processes]. Minsk, Narodnaya kniga Publ., 2008. 236 p.
8. Blyumenshteyn V.Yu., Makhalov M.S. *Issledovanie ostatnochnykh napryazheniy poverkhnostnogo sloya v protsessakh poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* [Investigation of residual stresses of the surface layer in the processes of surface plastic deformation]. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the NAS of Belarus. Physical-technical series], 2015, no. 3, pp. 41–48.
9. Bobrovskiy N.M., Vilchik V.A., Bokk V.V., Bobrovskiy I.N. *Raspredelenie temperatur pri vyglazhivanii shirokim samoustanavlivayushchimsya instrumentom* [Temperature distribution when smoothing with a wide self-aligning tool]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences], 2008, iss. 6, pp. 22–30.
10. Melnikov P.A., Popov A.I., Lipandina N.V. *Modelirovanie protsessa formirovaniya mikroreliefa obrabotannoy poverkhnosti v zavisimosti ot kinematiki formoobrazovaniya* [Modeling the process of forming the microrelief of a machined surface depending on the kinematics of shaping]. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Science vector of Togliatti State University], 2010, no. 3(13), pp. 112–114.
11. Gurov R.V. *Metodologiya proektirovaniya operatsiy odelochno-uprochnyayushchey obrabotki detaley mashin poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem* [Methodology for designing operations of finishing and strengthening processing of machine parts by surface-plastic deformation]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Brest State Technical University], 2010, no. 4(28), pp. 17–23.
12. Gubanov V.F. *Vyglazhivanie: kachestvo, tekhnologii, instrumenty* [Smoothing: quality, technologies, tools]. Moscow, Izdatelskiy dom Akademii Estestvoznaniya Publ., 2013. 70 p.
13. Torbilo V.M. *Almaznoe vyglazhivanie* [Diamond smoothing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 105 p.
14. Braslavskiy V.M. *Tekhnologiya obkatki kruglykh detaley rolkami* [Running in technology for round parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 160 p.
15. Papshev D.D. *Odelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem* [Finishing and hardening treatment with surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 152 p.
16. Ryazanova-Khitrovskaya N.V., Pyzhov I.N., Kryukova N.V. *Nekotorye puti povysheniya effektivnosti protsessa almaznogo vyglazhivaniya* [Some ways to improve the efficiency of the diamond smoothing process]. *Vysoki tekhnologii v mashinobudovani* [High technologies in mechanical engineering], 2015, no. 1(25), pp. 173–182.
17. Melnikov P.A., Bobrovskiy N.M. *Optimizatsiya parametrov protsessa vyglazhivaniya v proizvodstvennykh usloviyakh s tselyu polucheniya poverkhnosti, prigodnoy dlya raboty v usloviyakh gidrodinamicheskogo treniya* [Optimization parameters of the smoothing process in production conditions in order to obtain a surface suitable for work in conditions of hydrodynamic friction]. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Science vector of Togliatti state university], 2011, no. 2(16), pp.65–67.
18. Kulgeyko G.S., Kulgeyko M.P. *Znachenie funktsionalnoy tochnosti porshnevoy pary aksialnykh rotorno-porshnevnykh mashin* [Value of the functional accuracy of a piston pair of axial rotary piston machines]. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel], 2018, no. 2(73), pp. 7–13.